

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vladimir Petrović

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Toma Udiljak, dipl. ing.

Student:

Vladimir Petrović

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Tomi Udiljak na strpljenju, ustupljenoj literaturi i korisnim savjetima tijekom izrade rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i strpljenju tijekom školovanja.

Vladimir Petrović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Vladimir Petrović** Mat. br.: 0035137566

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ NAGIBA OSI GLODALA NA HRPAVOST OBRADENE POVRŠINE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF TOOL AXIS INCLINATION ON SURFACE ROUGHNESS**

Opis zadatka:

Glodanje je najfleksibilniji i jedan od najčešće korištenih postupaka obrade odvajanjem. Značajke obradaka i potreba za konkurentom proizvodnjom potiču sve veću primjenu petoosnog glodanja i odgovarajućih koncepcija alatnih strojeva. Najvažnije prednosti petoosnih u odnosu na troosne obrade očituju se u većoj produktivnosti, većoj točnosti, boljoj kvaliteti obrađene površine, manjem broju reznih alata, manjem broju naprava za stezanje te manjoj potrošnji prostora, energije i ljudskih resursa. Jedna od osnovnih značajki petoosne obrade je mogućnost promjene kuta nagiba osi glodala u odnosu na obrađivanu površinu.

U radu je potrebno eksperimentalno utvrditi ovisnost hrapavosti obrađene površine o kutu nagiba osi glodala u odnosu na obrađenu površinu. Obradu treba izvršiti prstastim glodalom s okruglim vrhom. Pri tome je kut nagiba glodala potrebno mijenjati u ravnini koja je okomita na obrađivanu površinu i sadrži pravac posmičnog gibanja, te u ravnini koja je okomita na obrađivanu površinu i na pravac posmičnog gibanja.

Zadatak zadan:

8. ožujka 2012.

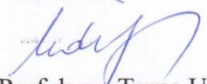
Rok predaje rada:

10. svibnja 2012.

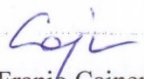
Predviđeni datum obrane:

16., 17. i 18. svibnja 2012.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Toma Udiljak

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	
POPIS TABLICA.....	
SAŽETAK.....	
1 UVOD	1
2 PETOOSNE OBRADU.....	2
2.1 Razvitak petoosnih strojeva.....	2
2.2 Primjena petoosne obrade.....	3
3 RAZINE UPRAVLJANJA ALATNIH STROJEVA	7
3.1 Osnovne karakteristike numeričkog upravljanja (NC).....	7
3.2 Princip rada NC sustava	8
3.3 Računalno numeričko upravljanje (CNC)	9
3.4 Direktno numeričko upravljanje (DNC).....	10
3.5 Sustavi adaptivnog upravljanja (AC)	11
4 CAD/CAM.....	14
4.1 Osnovne definicije	14
4.2 CAD sustavi.....	15
4.3 CAM sustav	16
4.4 Prednosti i mogućnosti korištenja CAD/CAM-a.....	17
5 KONCEPCIJE STROJEVA ZA PETOOSNU OBRADU	19
5.1 Klasifikacija strojeva prema rasporedu osi kojima se mogu gibati alat i obradak	20
5.2 Klasifikacija strojeva prema lokaciji rotacijskih osi	22
6 KINEMATIČKI MODEL.....	26
6.1 Geometrija prstastog glodala sa oblim vrhom kod 3-osnog glodanja	26
6.2 Geometrija prstastog glodala sa oblim vrhom kod 5-osnog glodanja	32

7	GRANICE OBRADE	37
7.1	Ulazni i izlazni kutevi kod 5-osnog glodanja	37
7.2	Područje djelovanja	38
7.3	Model određivanja debljine odvojene čestice	39
8	SILE REZANJA	41
9	RADNA GEOMETRIJA	42
9.1	Koordinatni sustavi, kutevi valjanja i poniranja	42
9.2	Zone djelovanja	43
9.3	Visina neravnina	44
10	UČINCI KUTEVA VALJANJA I PONIRANJA NA PROCES	46
10.1	Uvjeti i izbjegavanje kontakta vrha prstastog glodala sa oblim vrhom sa površinom radnog komada	46
10.2	Visina neravnina	51
10.3	Rezni moment, sile i oblik pogreške	52
10.4	Operacije grube obrade	52
10.5	Operacije završne obrade	54
10.6	Stabilnost	55
11	EKSPERIMENT	58
11.1	Uvjeti obrade	58
11.2	Opis obrade uzoraka i rezultati mjerenja	62
11.3	Obrada uzoraka u rasponu kuteva poniranja od 0° do 30°	62
11.4	Obrada uzoraka u rasponu kuteva valjanja od -30° do +30°	70
12	PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA	81
13	ZAKLJUČAK	82
	PRILOZI	84
	LITERATURA	85

POPIS SLIKA

Slika 1.	Primjena 5-osne obrade u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji	4
Slika 2.	Primjena 5-osne obrade u automobilske industriji	5
Slika 3.	Primjena 5-osne obrade u medicinske industriji	6
Slika 4.	Princip rada NC sustava	8
Slika 5.	Panel za upravljanje CNC stroja.....	9
Slika 6.	Spajanje NC/CNC strojeva pomoću DNC upravljanja	11
Slika 7.	Sustav adaptivnog upravljanja.....	12
Slika 8.	Osnovni koncept AC kod obrade tokarenjem.....	13
Slika 9.	CAD/CAM sustav	15
Slika 10.	CAD sustav	16
Slika 11.	CAM sustav.....	17
Slika 12.	Koncepcija stroja XYZA'B' iz grupe 3/2'	20
Slika 13.	Koncepcija stroja XBYAZ iz grupe 2/3'	21
Slika 14.	Koncepcija stroja sa obje rotacijske osi na obradnom stolu	22
Slika 15.	Koncepcija stroja sa obje rotacijske osi na glavnom vretenu	23
Slika 16.	Koncepcija stroja sa rotacijskim osima na glavnom vretenu i na stolu	24
Slika 17.	Geometrija prstastog glodala s oblim vrhom	26
Slika 18.	Definicija kuta spirale	27
Slika 19.	Veza z i ψ u odnosu na R_0 i i_0	29
Slika 20.	Promjena radijusa dodirne točke alata u ovisnosti na aksijalnu udaljenost	29
Slika 21.	XYZ (WCS) i xyz (TCS) ilustracija koordinatnih sustava	32
Slika 22.	Prikaz vrijednosti $incx$	34
Slika 23.	Prikaz vrijednosti $incy$	35
Slika 24.	Učinak nagiba glodala na ulazne i izlazne kuteve	37
Slika 25.	Područje djelovanja za $incx > 0$ slučaj.....	38
Slika 26.	Područje djelovanja za $incx < 0$ slučaj.....	39
Slika 27.	Prikaz $t(K)$	40
Slika 28.	Koordinatni sustavi i kutevi valjanja i poniranja.	42

Slika 29. (a) Područja zahvata reznog alata za pozitivni kut valjanja (15) i pozitivni kut poniranja (40), (b) za pozitivni kut valjanja (15) i negativni kut poniranja (-40), (c) slučaj prvog reza; 3D pogled i (d) 2D pogled na ravninu CN.....	43
Slika 30. Visina neravnina : (a) $s < 2R_0 \cos \alpha$ i (b) $s > 2R_0 \cos \alpha$	45
Slika 31. Slučaj negativnog kuta valjanja	47
Slika 32. (a) Izbjegavanje kontakta vrha glodala sa površinom radnog komada u slučaju prvog reza, (C) smjer pozitivan, (b) (C) smjer negativan, (c) kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada u slučaju uzastopnog reza, (C) smjer pozitivan, kut poniranja pozitivan i (d) kut poniranja negativan.	50
Slika 33 Promjene za (a) visina neravnina i (b) dopušteni aksijalni pomak za kut poniranja	52
Slika 34. Prikaz lokalnih sila rezanja	53
Slika 35. Učinak kuteva valjanja i poniranja na smjer posmaka: (a) 3-osno glodanje i (b) 5-osno glodanje.....	56
Slika 36. DMU 80 monoBLOCK.....	58
Slika 37. Tvrdometalno prstasto glodalo sa oblim vrhom	59
Slika 38. Obrada uzoraka u rasponu kuteva poniranja od 0° do 30°	62
Slika 39. Obradeni uzorak u rasponu kuteva poniranja 0° do 30°	63
Slika 40. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 30°	63
Slika 41. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 25°	64
Slika 42. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 20°	64
Slika 43. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 15°	64
Slika 44. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 10°	65
Slika 45. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 5°	65
Slika 46. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 0°	65
Slika 47. Prikaz rezultata za aluminijski uzorak u rasponu kuteva poniranja od 0° do 30° ..	66
Slika 48. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 30°	66
Slika 49. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 25°	67
Slika 50. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 20°	67
Slika 51. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 15°	67
Slika 52. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 10°	68
Slika 53. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 5°	68
Slika 54. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 0°	68
Slika 55. Prikaz rezultata za čelični uzorak u rasponu kuteva poniranja od 0° - 30°	69

Slika 56.	Obrada uzoraka u rasponu kuteva valjanja od -30° do $+30^{\circ}$	70
Slika 57.	Obrada uzorka u rasponu kuteva valjanja od -30° do $+30^{\circ}$	70
Slika 58.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -30°	71
Slika 59.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -25°	71
Slika 60.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -20°	71
Slika 61.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -15°	72
Slika 62.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -10°	72
Slika 63.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -5°	72
Slika 64.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+5^{\circ}$	73
Slika 65.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+10^{\circ}$	73
Slika 66.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+15^{\circ}$	73
Slika 67.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+20^{\circ}$	74
Slika 68.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+25^{\circ}$	74
Slika 69.	Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+30^{\circ}$	74
Slika 70.	Prikaz rezultata za aluminijski uzorak u rasponu kuteva valjanja od -30° do $+30^{\circ}$ 75	
Slika 71.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -30°	76
Slika 72.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -25°	76
Slika 73.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -20°	76
Slika 74.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -15°	77
Slika 75.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -10°	77
Slika 76.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -5°	77
Slika 77.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+5^{\circ}$	78
Slika 78.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+10^{\circ}$	78
Slika 79.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+15^{\circ}$	78
Slika 80.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+20^{\circ}$	79
Slika 81.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+25^{\circ}$	79
Slika 82.	Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+30^{\circ}$	79
Slika 83.	Prikaz rezultata za čelični uzorak u rasponu kuteva valjanja od -30° do $+30^{\circ}$	80

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Scrit vrijednost za navedene slučajeve.....	49
Tablica 2.	Kemijski sastav aluminijsa AlSi11Mg.....	60
Tablica 3.	Kemijski sastav čelika Č1.2343.....	61

SAŽETAK

Ovaj rad pokušat će opisati utjecaj nagiba osi prstastog glodala sa oblim vrhom na kvalitetu obrađene površine. Također će biti opisani svi bitni parametri petoosne obrade.

Veći dio rada posvećen je procesu petoosnog glodanja. Tako su prikazani svi bitni čimbenici koji čine proces petoosne obrade, počevši od primjene, vrste upravljanja, CAD/CAM-a, koncepcije strojeva, sila koje se javljaju u procesu petoosne obrade te su detaljno opisani nagibi glodala i njihovi učinci na proces.

Drugi dio rada je eksperimentalni dio, gdje je na obrađenim uzorcima izvršeno mjerenje površinske hrapavosti, te su pri tome prikazani negativni i pozitivni ujecaji nagiba osi glodala na hrapavost površine.

1 UVOD

Proizvodnja dijelova sa složenim površinama donosi dodatni izazov kao što je pristupačnost reznog alata i oblikovanje same geometrije izratka. Petoosno glodanje pruža mnogo bolju pristupačnost uz pomoć povećane sposobnosti orijentacije reznog alata.

No, 5-osno glodanje također donosi dodatne teškoće zbog kompliciranog procesa geometrije i mehanike. Nagibi valjanja i poniranja određuju orijentaciju reznog alata i uključenog područja obrade, te utjecaj na mehaniku i dinamiku procesa. Debljina odvojene čestice, koeficijenti sile rezanja, dinamičke sile i stabilnost su određene tim nagibom glodala. Nepravilna orijentacija alata može dovesti do smanjene produktivnosti, slabije kvalitete površine, te se zbog veće sile rezanja javljaju veće površinske pogreške i proces postaje nestabilniji. Dakle, nagibi poniranja i valjanja vrlo su važni parametri u 5-osnom procesu glodanja.

Učinak nagiba valjanja i poniranja na proces nije poznat vrlo dobro, i ne mogu se lako procijeniti parametri, kao što su posmak i dubina rezanja.

Učinci nagiba valjanja i poniranja na proces su proučavani uglavnom u dva aspekta: proces kinematike i proces mehanike. Kinematika je najviše istraživani aspekt, gdje je uvjete za nesmetano kretanje reznog alata, neželjene kolizije reznog alata i radnog komada i sudare kretnji za pozicioniranje alata studiralo nekoliko autora. Između ostalih, jedan od autora je eksperimentalno ispitivao učinke orijentacije alata i smjerove rezanja u 5-osnom glodanju turbinske lopatice. Uglavnom su upotrebljavali 4 smjera rezanja sa kombinacijom valjanja/poniranja od 15 stupnjeva, i zaključili da je najbolja strategija obrade “horizontalno prema unutra sa nagibom poniranja”.

U ovom radu će biti opisan utjecaj nagiba reznog alata na kvalitetu površine, sile koje se pri tome stvaraju i učinak tih istih sila na površinu izratka.

2 PETOOSNE OBRADE

2.1 Razvitak petoosnih strojeva

Povijest petoosne obrade počinje s potrebama zrakoplovne industrije pedesetih godina dvadesetog stoljeća, a slične potrebe javile su se i kod izrade opreme za transport, konstrukcije, kućne aplikacije itd. Bilo je potrebno obraditi zahtjevne i kompleksne površine koje su bile zakrivljene i nagnute pod više različitih kutova. Takve zahtjevne i kompleksno zakrivljene površine obrađivale su se na troosnim alatnim strojevima za glodanje, kompenzirajući nedostatak dviju osi raznim specijalnim alatima, prihvatima obratka i obradom dijela s nekoliko strana da bi se dobila zadovoljavajuća razina gotovosti. Raznim kompanijama tada je postalo jasno da je neophodno uvesti simultanu petoosnu obradu u svoje poslovanje. To je bio preokret u razvoju strojeva za glodanje s pet simultanih osi gibanja i pripadajućih upravljačkih računala. Povijest petoosne obrade seže u 1958 g., kada je jedan od prvih projekata bio uspostavljen za U.S. Air Force kompaniju, Cincinnati Milacron. Zatim Cincinnati Milling Machine Co. imali su ugovor o petoosnoj vertikalnoj glodalici koja je trebala biti pogonjena sa tri tzv. „kontrolera“. Stroj je imao pet osi gibanja (X, Y, Z, A i B). Jedan kontroler bio je zadužen za translacijsko gibanje triju osi (X,Y,Z), dok je drugi bio zadužen za prvu rotacijsku os (A), a treći za drugu rotacijsku os (B).

Stroj je uključivao mehaničko računalo koje je pratilo dubinu glodala triju translacijskih osi (X, Y, Z) i dva kuta nagiba rotacijskih osi (A i B). Bio je to zahtjevan zadatak. Cijeli projekt nazvan je “Opium Mill”. Takav naziv je implicirao na koncept koji nije bio u doticaju sa stvarnošću za tadašnje vrijeme. Bez NC tehnologije koncept nije bio praktičan za upotrebu.

Četiri su glavne stavke, tj. tehnologije bile ključne za kvalitetnu primjenu petoosne obrade, a to su kako slijedi:

- alatni stroj,
- upravljački hardver,
- upravljački softver,
- softver za programiranje obrade dotičnog dijela.

Danas je takvoj obradi neosporno pomogao ubrzani razvoj računala i prateće tehnologije, razvoj elektronike koji je doprinio projektiranju kvalitetnih i vrlo moćnih upravljačkih jedinica.

Danas se na tržištu također nudi veliki broj CAD programa koji su sve više povezani (integrirani) s CAM programima, što krajnjem korisniku uvelike olakšava put od ideje pa do gotovog obrađenog dijela.

2.2 Primjena petoosne obrade

Primjena petoosne obrade donijela je značajne prednosti u proizvodnji. Međutim i dalje se konstantnim poboljšanjima u konstrukciji strojeva stalno otklanjaju postojeći nedostaci. Kod velikih površina sa velikim polumjerima zakrivljenosti vrijeme obrade može se smanjiti za 20-30%. To je posljedica činjenice da petoosna upravljačka računala putanje alata po površinskoj geometriji predmeta računaju vrlo precizno koristeći matematičke funkcije, te se stoga i dobivaju puno bolje obrađene površine nego kod sustava gdje se geometrijske forme računaju na principu trokuta ili sličnih entiteta. Kada je u pitanju obrada, npr. strme površine jezgra kalupa za injekcijsko presanje, upravljačko računalo generira petoosnu putanju alata na konveksnoj površini gdje koristi vanjski promjer glodala na kojem je brzina rezanja maksimalna. Posljedica toga je reduciranje vremena obrade i kvalitetnije obrađena površina. [5]

Kada se obrađuju dijelovi obradaka malih površina i velikih polumjera zakrivljenosti, često se koriste glodala sa zaobljenim vrhom (Eng. Ball End). Kod petoosnih sustava glodalo može biti nagnuto u odnosu na površinu obrade pod optimalnim kutom tako da se dobije konstantan presjek odvojene čestice što rezultira povoljnim uvjetima obrade u kontaktnoj točki. Na taj način dobije se bolja kvaliteta obrađene površine s time da se i vijek trajanja reznog alata može značajno produžiti.

➤ *Dijelovi za zrakoplovnu i svemirsku industriju*

Visoka preciznost i mala težina dijelova su ključni u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Petoosna obrada je postala nezamjenjivi način izrade dijelova za zrakoplovnu i svemirsku industriju – dobivaju se dijelovi sa kompleksnim površinama, male mase izrađeni iz jednog komada.

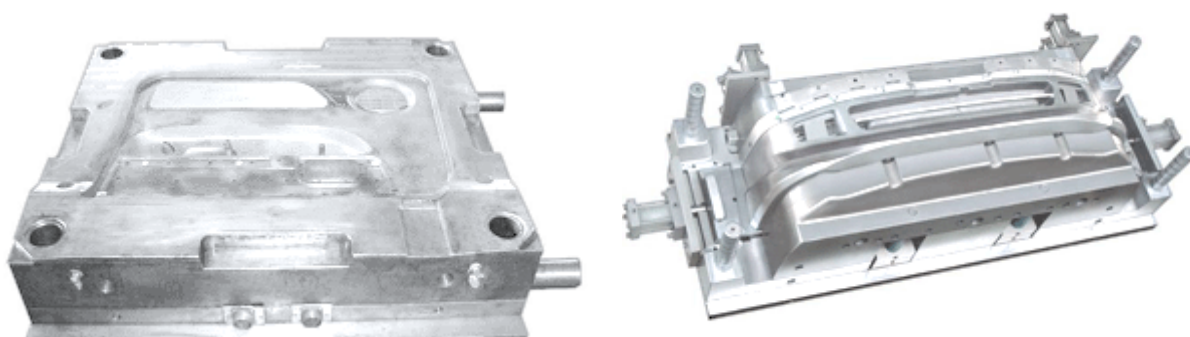


Slika 1. Primjena 5-osne obrade u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji [5]

Računalno potpomognuta optimizacija omogućava da se geometrija komponente prilagodi zadanim opterećenjima. Gledajući sa strane čvrstoće, na ovaj način smanjujemo težinu dijelova bez gubitka čvrstoće.

➤ *Dijelovi za automobilsku industriju*

Brojni kalupi i matrice su potrebni u automobilske industriji za proizvodnju različitih limova i plastičnih dijelova. Matrice za proizvodnju limenih dijelova mogu proizvoditi komade dužine i do 6m i moraju biti obrađene sa jako visokom preciznošću tako da gornji i donji dio matrice mogu raditi precizno sa točno potrebnim razmakom. Štoviše, zahtjeva se visoka kvaliteta površine matrica radi dugog vijeka trajanja.



Slika 2. Primjena 5-osne obrade u automobilskoj industriji [5]

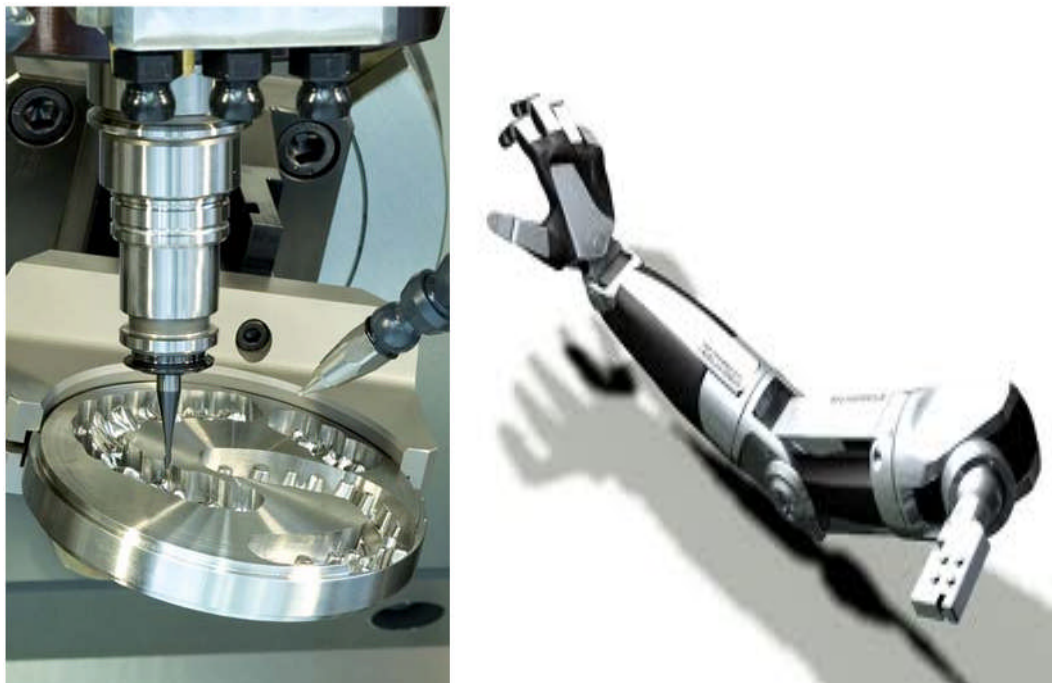
Kod obrade konture alata za oblikovanje, rezni alat mora održati mali razmak između reznih putanja da bi se ispunili zahtjevi za kvalitetom površine. Ovo automatski produžuje trajanje NC programa. Potrebna kvaliteta oblikovanja kalupa postavlja izazov za alatne strojeve : visoka točnost tijekom dugog vremena rada programa na velikim komponentama, što zahtjeva visoku termičku stabilnost stroja.

Petoosna obrada otvara nove perspektive u pogledu skraćivanja vremena obrade jer i čak najzakrivljenije konture alata za oblikovanje postaju lako pristupačne i obradive.

➤ *Dijelovi za medicinsku industriju*

U području medicinske tehnologije, potražnja je velika za uređajima koji su prilagođeni posebnim pregledima i terapijama. Ovo može učiniti liječenje znatno preciznijim

i smanjiti negativne utjecaje na pacijente. Uređaji su često kategorizirani pa vrlo složenim geometrijama, što čini petoosnu izradu ovih dijelova jako zahtjevnu i atraktivnu.



Slika 3. Primjena 5-osne obrade u medicinskoj industriji [5]

Povećanje očekivanog vijeka trajanja sa sobom donosi i povećane zahtjeve u stomatološkoj grani medicine i izradi implantata. Danas, pomoću raznih novih tehnologija, zamjena kuka i koljena može pridonijeti boljoj kvaliteti života kod nekih ljudi. U svom vanjskom obliku, zubi i razni implantati moraju biti savršeno uklopljeni sa ljudskim tijelom. Implantati su uglavnom izrađeni na glodalicama, jer glodanje čini izradu malih serija proizvoda mogućim. S obzirom na složeno oblikovanje implantata, medicinska tehnologija je jedno od najvećih područja primjene petoosne obrade. [5]

3 RAZINE UPRAVLJANJA ALATNIH STROJEVA

Alatne strojeve prema načinu upravljanja možemo podijeliti na:

- *Strojeve bez memorije i upravljanja*
 - Individualno upravljanje (operator na stroju)
- *Strojevi sa krutom memorijom (mehanički nosač informacija)*
 - Mehaničko upravljanje (pločaste krivulje, bubanj krivulje)
 - *Poluautomatsko upravljanje*
 - *Automatsko upravljanje*
 - Kopirno upravljanje (šablone)
 - *Jednoosno*
 - *Višeosno*
- *Strojevi sa fleksibilnom memorijom*
 - Repetitivno upravljanje (playback metoda)
 - Numeričko upravljanje NC
 - Računalno numeričko upravljanje CNC
 - Adaptivno upravljanje AC

3.1 Osnovne karakteristike numeričkog upravljanja (NC)

- *Prednosti NC*
 - Fleksibilnost obrade (složeni oblici, visoka točnost izrade, visoka produktivnost i kvaliteta)
 - Podešavanje i rad na stroju je jednostavno što zahtjeva niže kvalificiranog radnika, može obavljati više poslova odjednom.
 - Moguće podesiti više operacija odjednom, što skraćuje vrijeme izrade
 - Program se može jednostavno i brzo opozvati, kao i poslati novi program
 - Brza izrada prototipa

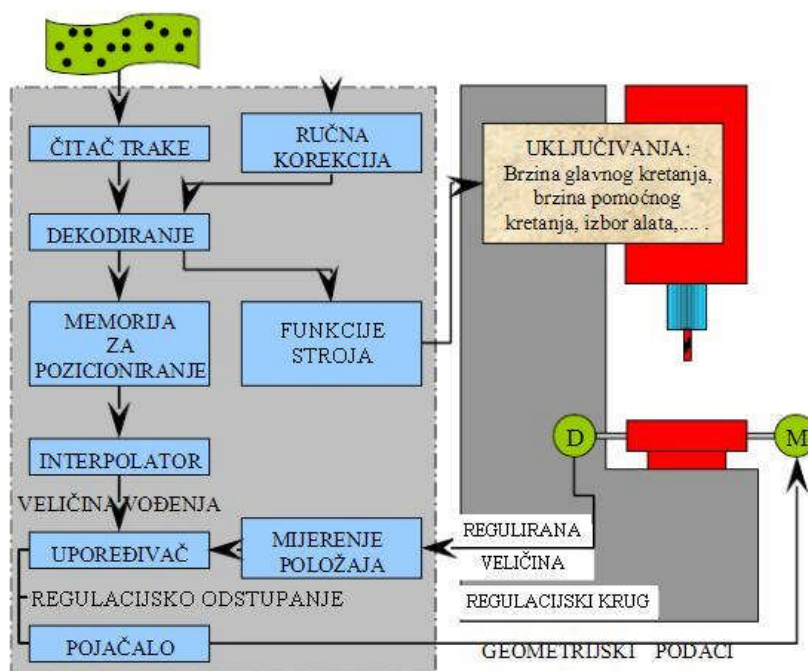
➤ *Nedostaci NC*

- Relativno visoki početni troškovi ulaganja u opremu
- Potrebno računalno vrijeme i troškovi programiranja
- Zahtjevno održavanje (visoko obučen radnik)
- Potreba za preventivnim održavanjem (troškovi zastoja preveliki)

3.2 Princip rada NC sustava

Podaci preko nosača informacije (traka) ulaze u obliku signala u dekode, gdje se vrši dekodiranje informacija koje se zatim šalju preko „memorije“ u interpolator. Tu se informacija predstavlja u vidu putanje alata. Preko povratne veze mjerni sustav obavlja identifikaciju položaja alata i zajedno sa zadanim veličinama u interpolatoru vrši se usporedba položaja i šalje signal za korekciju (ako je potrebna).

Cijeli ovaj proces se odvija u programskim blokovima (jedan po jedan) i brzina izvođenja programa ovisi isključivo o brzini čitača informacija. Zbog toga, a i radi nemogućnosti aktivnog sudjelovanja u izvršenju programa (korekcija), greške pri učitavanju programa, itd, dovele su do napuštanja koncepcije NC upravljanja sa fiksnom logikom. [3]



M- Motor, D- Davač putanje

Slika 4. Princip rada NC sustava [3]

3.3 Računalno numeričko upravljanje (CNC)

Nedostaci NC alatnih strojeva sa fiksnom logikom, te stalni zahtjevi za većom fleksibilnošću upravljanja, potpomognut sa stalnim napretkom u elektronici, dovelo je do razvoja računalno numerički upravljanih strojeva (CNC). Po pojavi prvih CNC sustava konvencionalni NC sustavi su postepeno zastarijevali sve dok nisu potpuno prestali da se proizvode. Softverska konfiguracija CNC je nudila bržu i pouzdaniju implantaciju programa, mogućnost unosa preko tastature, RS-232 C komunikacijskih uređaja i raznih vanjskih memorija.

Neke od prednosti CNC upravljanja su:

- Numerička ili računalna kontrola omogućava nadzor svih funkcija koje je tradicionalno obavljao "majstor"
- Numerička ili računalna kontrola omogućava visoko serijsku i masovnu proizvodnju proizvoda.
- Računalno upravljanje strojem omogućava pohranjivanje programa, njihovo pozivanje, editiranje i prilagođavanje prema potrebama.
- Računalna kontrola omogućava dijagnostiku stanja obrade i kontrolu kvalitete proizvoda.
- Svi CNC programi sadrže niz sekvencijalnih instrukcija ili kodiranih komandi kojima se upravlja sa svim funkcijama stroja.
- CNC program može biti generiran ručno ili uz računalnu podršku.



Slika 5. Panel za upravljanje CNC stroja

Svi računalno upravljani strojevi su u mogućnosti precizno izvoditi i potpuno jednako ponavljati kretnje alata u raznim pravcima. Svaki od ovih pravaca kretnji naziva se "os". CNC strojevi obično imaju 2 do 5 osi.

3.4 Direktno numeričko upravljanje (DNC)

Alatnim strojevima moguće je upravljati pojedinačno, grupno i kao dijelom integralnog proizvodnog sustava. Potreba za istodobnim upravljanjem više NC strojeva dovela je do razvoja DNC sustava upravljanja.

DNC mora zadovoljiti sljedeće:

➤ *Osnovne funkcije*

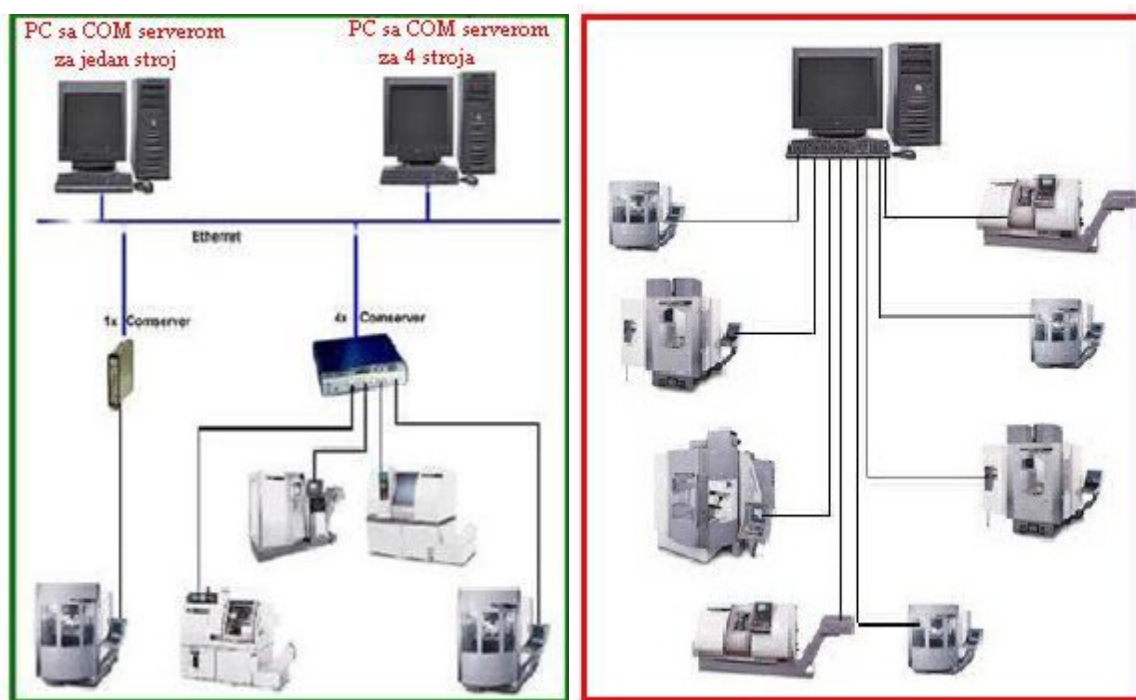
- Upravljanje NC programima (čitanje programa, spremanje u memoriju, izvođenje i brisanje programa)

➤ *Dodatne funkcije*

- Editiranje NC programa
- Unošenje NC programa
- Spremanje i obrada NC podataka
- Upravljanje tokom materijala
- Upravljanje proizvodnjom

Prednosti DNC u odnosu na konvencionalno NC upravljanje:

- Povećana produktivnost (brža obrada i dostupnost informacija, smanjenje papirologije)
- Prijenos velikog broja podataka (veliki memorijski kapacitet)
- Stalni nadzor stanja: proizvodnja, alati, naprave.



Slika 6. Spajanje NC/CNC strojeva pomoću DNC upravljanja [3]

Ovisno o financijskim mogućnostima kao i zahtjevima koje stavljamo pred DNC sustave, imamo različite varijante povezivanja alatnih strojeva.

Slika6 (lijevo) pokazuje spajanje koje je moguće uz minimalne instalacijske i hardverske troškove. Moguće je povezivanje do 8 strojeva putem serijske veze RS-232 u slučaju malih (max 20m) udaljenosti između strojeva i računara.

Slika5 (desno) pokazuje spajanje koje omogućava povezivanje alatnih strojeva putem instalirane mreže pri čemu serijski portovi (Comserver) omogućuju povezivanje mreže i stroja putem RS-232 veze. [3]

3.5 Sustavi adaptivnog upravljanja (AC)

Ograničene mogućnosti numeričkog upravljanja u smislu fleksibilnosti i optimizacije obradnog procesa dovele su do razvoja novog koncepta upravljanja nazvanog **ADAPTIVNO UPRAVLJANJE (AC)**. Adaptivno upravljani proces za podlogu ima NC sustav proširen (senzori) dodatnim modifikacijama koji omogućuju *varijaciju parametara obrade* u samom *toku obrade*, a u cilju postizanja unaprijed *definiranih zadataka* (kriterija) ovisno o

korištenom adaptivnom sustavu. Prema zadatku i načinu djelovanja upravljani sustavi se mogu podijeliti uvjetno na dvije grupe:

➤ *Tehnološki sustav*

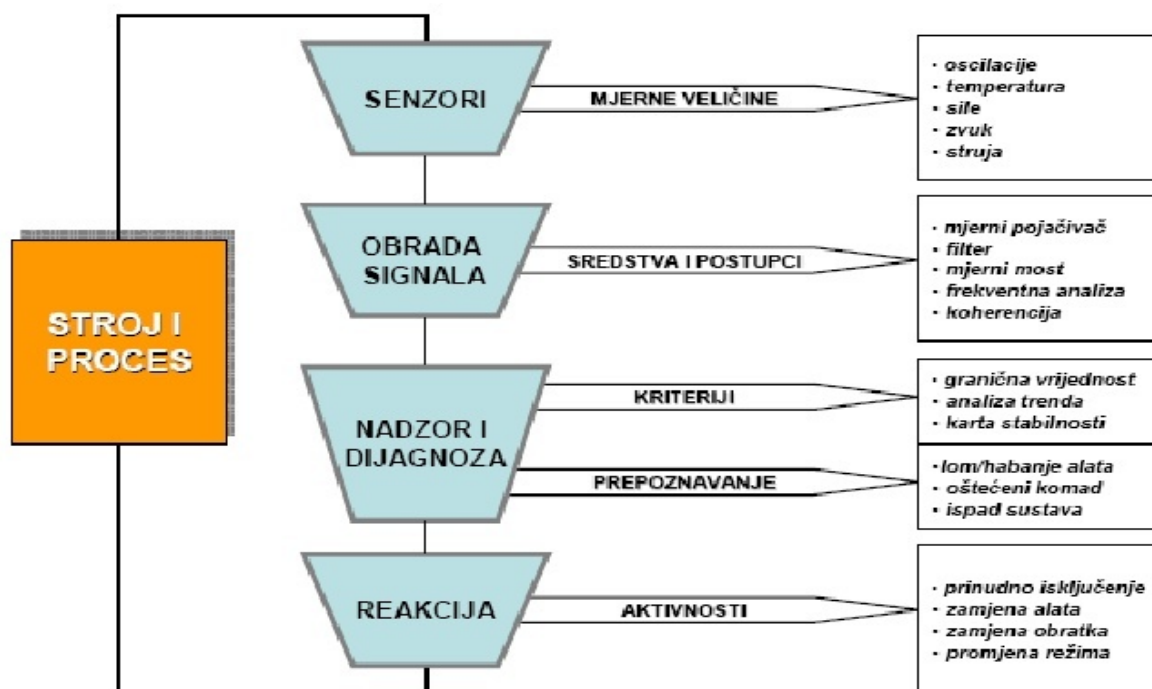
- Adaptivno granično upravljanje (ACC - Adaptive Control Constraint)
- Adaptivno optimalno upravljanje (ACO – Adaptive Control Optimization)

➤ *Geometrijski sustav*

- Adaptivno geometrijsko upravljanje (ACG – Adaptive Control Geometry)

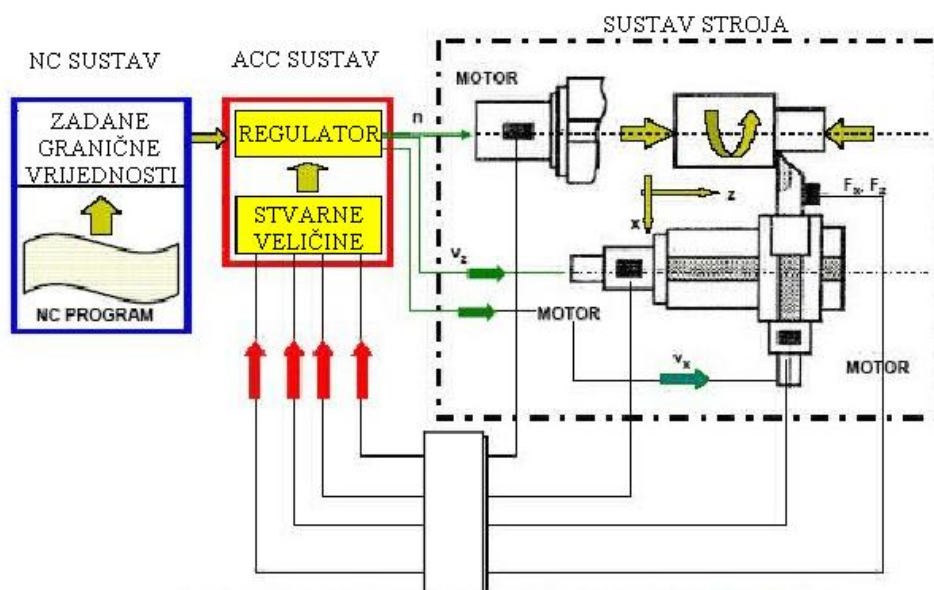
Adaptivno upravljani sustavi (Slika6) omogućava registriranje veličine utjecajnih faktora, čime se osigurava mogućnost prilagođavanja elemenata režima obrade, npr. broj okretaja, posmak, dubina rezanja, itd., kompenzirajući djelovanje utjecajnih faktora radi smanjenja proizvodnih troškova ili povećanja kvalitete obrade.

Utjecajni faktori mogu biti: odstupanje čvrstoće obratka od predviđenog, rezne pukotine u pripremku, promjena tvrdoće alata, netočnost kutova alata, oscilacije stroja itd.



Slika 7. Sustav adaptivnog upravljanja [3]

Analizirajući obradni proces na temelju klasičnog NC evidentna je neosjetljivost obradnog sustava na ometajuće utjecaje koji prate svaki proces obrade. Ovo proizlazi iz koncepta NC koje nema funkciju izmjene parametara ovisno o uvjetima obrade kao vremenske funkcije, tj. unaprijed programom definirane vrijednosti parametara ostaju na istoj razini neovisno o vremenu i ometajućim karakteristikama obrade. Klasično NC nije dopuštalo prilagođavanje trenutnim uvjetima obrade što je dovelo do stvaranja adaptivnih sustava koji imaju funkciju povratne veze. Koncept AC za obradu tokarenjem prikazan je na sljedećoj slici. [3]



Slika 8. Osnovni koncept AC kod obrade tokarenjem [3]

Izgradnja sustava AC je vrlo složen zadatak jer obuhvaća veliki broj parametara i ograničenja za što su potrebni pouzdani regulatori, senzori, sučelja itd.

Dva su osnovna koncepta AC:

- Deterministički
- Stohastički

Krajnji cilj AC je postizanje viših tehno ekonomskih učinaka.

4 CAD/CAM

CAD-CAM moderna kompjuterska tehnologija zasigurno je postala sastavni dio naše svakodnevnice. Danas, skoro svaka profesija koristi prednosti računala jer pruža nebrojene mogućnosti za kvalitetan i nadasve precizan rad.

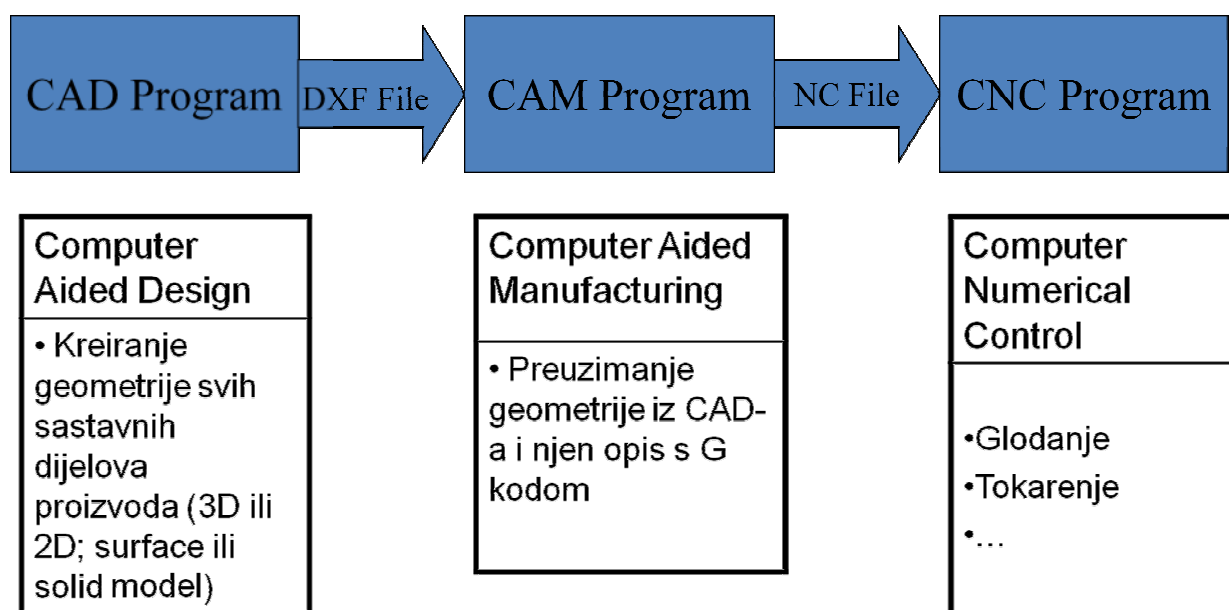
4.1 Osnovne definicije

➤ **CAD - Computer Aided Design** (Računalno podržano konstruiranje)

Primjena računala i grafičkog softvera za pomoć pri izradi ili poboljšanju konstrukcije proizvoda od koncipiranja do dokumentacije. Pomaže procesu konstruiranja u kreiranju geometrijske prezentacije onoga što se konstruira, dimenzioniranju i tolerancijama, upravljanje izmjenama konstrukcije, arhiviranju, razmjeni informacija o dijelovima i sklopovima, **uz pomoć računala**. [4]

➤ **CAM – Computer Aided Manufacturing** (Računalno podržana proizvodnja)

Tehnologija koja se bavi primjenom računala za planiranje, upravljanje i kontrolu proizvodnih operacija. Na temelju CAD modela vrši se generiranje tzv. G koda za obradu na strojevima upravljanim računalima. Danas su gotovo sve vrste obrada temeljene na CAM tehnologijama. [4]



Slika 9. CAD/CAM sustav [4]

4.2 CAD sustavi

CAD sustav čine elementi koji su međusobno povezani:

- *Korisnik (konstruktor)* - potrebno je da poznaje rad na računalu i ostaloj hardverskoj opremi, da koristi CAD softver i ostale potrebne programe, te da je sposoban rješavati postavljene konstrukcijski zadatak.
- *Hardver* - čini računalo i prateća oprema. Hardver treba biti prilagođen korisniku, da osigura efikasno funkcioniranje CAD softvera (više RAM memorije, brži procesor, kvalitetan monitor,...) i da može rješavati konkretne konstrukcijske zadatke. Za pojedine zadatke je potrebna dodatna specifična I/O oprema.
- *Softver* - čini, prije svega CAD softver, ali se pored toga koristi i operativni sustav, te različiti pomoćni programi. Za specifične namjene se koriste posebni dodatni moduli CAD softvera. Suvremena PLM rješenja teže da uključe što veći broj modula potrebnih za upravljanje cjelokupnim životnim vijekom proizvoda. Softver treba da bude prilagođen korisniku, da efikasno radi i upravlja hardverom, te da rješava postavljene zadatak.

- *Problem i konstrukcijski zadatak* - predstavlja ulaz u proces konstruiranja i razvoja proizvoda. Postavljeni zadatak utječe na ostale elemente CAD sustava. Za specifične probleme potrebna su posebna stručna znanja konstruktora. Specifični problemi zahtijevaju posebne karakteristike i/ili hardverska i softverska rješenja.

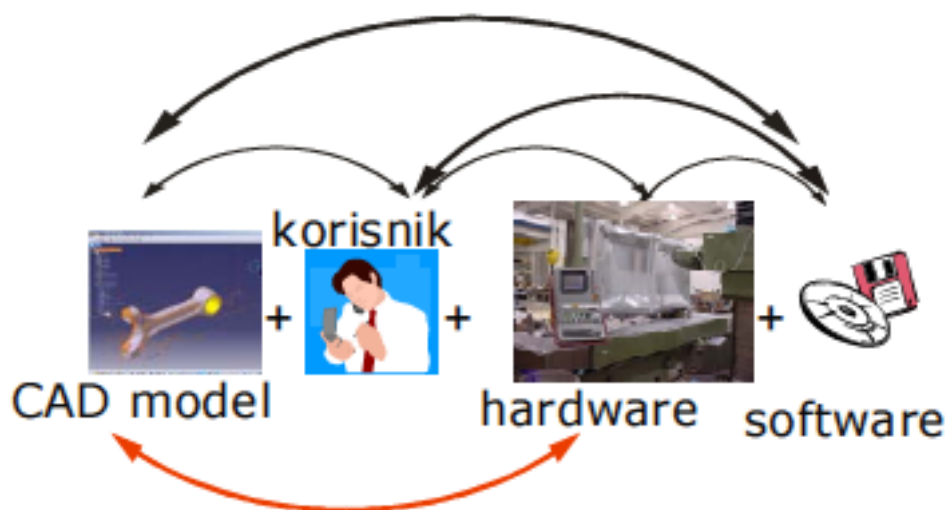


Slika 10. CAD sustav [4]

4.3 CAM sustav

Slično kao i kod CAD sustava, CAM sustav čine elementi koji su međusobno povezani.

- Ulaz za CAM sustav predstavlja CAD model. Pri definiranju CAD modela (u fazi konstruiranja) tehnologija izrade je već definirana ili je bitno ograničen izbor mogućih tehnologija.
- Hardver u CAM sustavu čine, prije svega numerički upravljani strojevi (CNC), obradni centri, fleksibilni proizvodni sustavi, itd., kao i računalo. Složenost i cijena CNC strojeva znatno premašuje složenost i cijenu računala, a suvremeni strojevi obično imaju svoje računalo.
- CAM softver može biti neovisan, povezan sa konkretnim strojem ili u okviru PLM rješenja.



Slika 11. CAM sustav [4]

4.4 Prednosti i mogućnosti korištenja CAD/CAM-a

Primjena CAD/CAM sustava daje brojne prednosti korisnicima, tako da se danas praktično ne postavlja pitanje da li ih treba koristiti, već koja su optimalna rješenja za konkretnu proizvodnu ili razvojnu firmu. U nastavku su navedene neke od prednosti CAD/CAM sustava:

- *Povećanje produktivnosti (brzine)* - Danas predstavlja jedan od najvažnijih zahtjeva koji se postavlja pred firme. Posjedovanje pravog rješenja u pravom trenutku predstavlja uvjet napredovanja i opstanka u uvjetima globalne konkurencije. Povećanje brzine se može postići na sljedeće načine:
 - Automatizacija rutinskih poslova radi povećanja kreativnosti,
 - Unos standardnih dijelova iz baze podataka,
 - Brza izrada prototipa
- *Podrška izmjenama na konstrukciji* - Lake i pouzdane izmjene konstrukcija, sa jedne strane omogućavaju otklanjanje grešaka koje nastaju u procesu konstruiranja, a sa druge strane, što je još važnije, mogućnost kreiranja brojnih varijanti i njihovo poboljšavanje u procesu optimizacije konstrukcijskih rješenja. Lake izmjene konstrukcije se ostvaruju na sljedeće načine:
 - Nema potrebe za ponovnim crtanjem svih dijelova poslije svake promjene,
 - Čuva prethodne konstrukcijske iteracije

➤ *Komunikacija* – se može promatrati sa sljedećih aspekata:

- Sa drugim timovima/inženjerima (proizvođači, dobavljači...)
- Sa drugim programima (CAD, CAM, CAE, ...)
- Sa marketingom (realistični prikaz konstrukcije)
- Urednost (visoko kvalitetni crteži)
- *Neke osnovne analize* - Pored osnovne namjene, suvremeni CAD softveri uključuju u sebi sve više modula. Danas su aktualni tzv. PLM (Product Lifecycle Management) softveri koji uključuju softverska rješenja za veliki broj (sve) faza životnog ciklusa proizvoda.

5 KONCEPCIJE STROJEVA ZA PETOOSNU OBRADU

Broj osi stroja normalno se odnosi na broj stupnjeva slobode gibanja ili broj mogućih nezavisno upravljanih pomičnih dijelova stroja. ISO nomenklatura za osi preporučuje korištenje desnog koordinatnog sustava s alatom postavljenim u smjeru Z osi.

Prilikom analize stroja sastavlja se njegov kinematički dijagram. Iz kinematičkog dijagrama odmah se mogu razabrati dvije grupe osi: osi kojima se upravlja kretanjem obratka i osi kojima se upravlja kretanjem alata. Pet stupnjeva slobode gibanja je minimum kojim je moguće ostvariti maksimalnu fleksibilnost. To znači da alat i obradak u zahvatu mogu biti orijentirani relativno jedan prema drugome pod bilo kojim kutom. Minimalni broj osi se također može odrediti sa gledišta kinematike krutog tijela. Za orijentaciju dva kruta tijela u prostoru relativno jednog prema drugome potrebno je za svako tijelo šest stupnjeva slobode, što je ukupno 12 stupnjeva slobode. Kako su rotacije i translacije koje ne mijenjaju relativan položaj tijela jednog prema drugom dozvoljene, broj stupnjeva slobode se smanjuje na šest. Razdaljina između alata i obratka označava se kao putanja alata, čime se eliminira još jedan stupanj slobode, što daje broj od minimalnih pet stupnjeva slobode. [6]

Koristeći translacijske (T) i rotacijske (R) osi, kod dosadašnjih konstrukcija petoosnih strojeva korištene su sljedeće kombinacije osi:

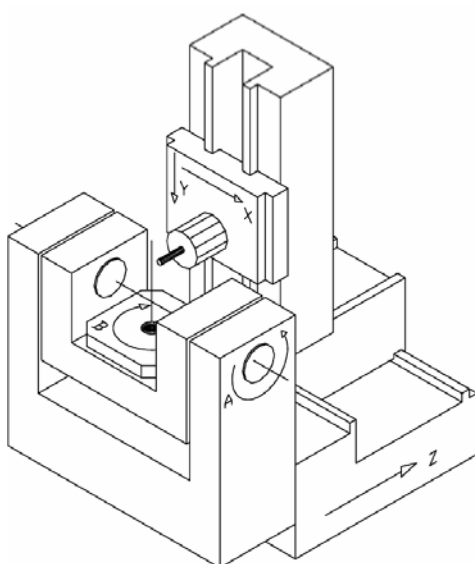
- tri translacijske i dvije rotacijske osi;
- dvije translacijske i tri rotacijske osi;
- jedna translacijska i četiri rotacijske osi;
- pet rotacijskih osi.

Međutim velika većina petoosnih strojeva spada u grupu strojeva sa tri translacijske i dvije rotacijske osi. Grupe strojeva sa dvije translacijske i tri rotacijske osi koriste se kod nekih strojeva za izradu brodskih propelera. Ostale dvije grupe koriste se kod nekih robota i to najčešće u kombinacijama sa dodavanjem dodatnih osi. Kako velika većina strojeva spada u grupu sa tri translacijske i dvije rotacijske osi, nadalje će se razmatrati samo oni.

5.1 Klasifikacija strojeva prema rasporedu osi kojima se mogu gibati alat i obradak

Uzimajući u obzir da li su osi stroja postavljene kao osi kojima se giba alat ili osi kojima se giba obradak, petoosni strojevi mogu pripadati u sljedeće grupe:

- 0/5'
- 1/4'
- 2/3'
- 3/2'
- 4/1'
- 5/0'

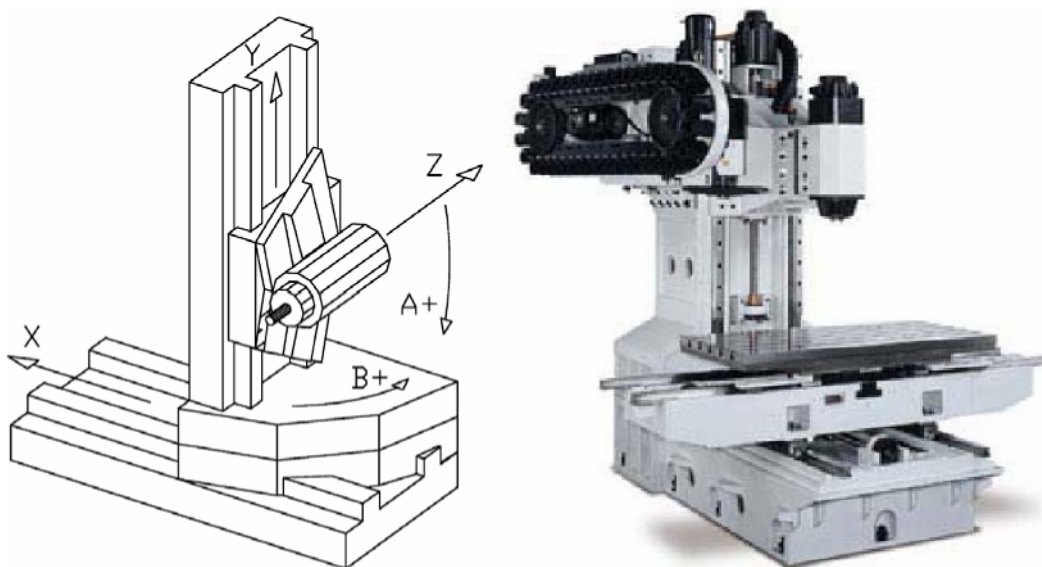


Slika 12. Konceptija stroja XYZA'B' iz grupe 3/2' [6]

Ovdje oznaka bez apostrofa predstavlja osi kojima se giba alat, a oznaka s apostrofom (') predstavlja osi kojima se giba stol sa obratkom. Brojevi označuju broj osi.

5/0' strojevi – po svim osima se giba alat, dok je obradak fiksiran na stolu. Ovi strojevi su jedni od prvih modela petoosnih strojeva koji su namijenjeni za obradu masivnijih obradaka. Kako se u kinematici kretanja alata nalazi mnogo veznih točaka, mogu se na obrađivanoj

površini pojaviti značajne greške uzrokovane elastičnim deformacijama i zračnostima u ležajevima.



Slika 13. Konceptcija stroja XBYAZ iz grupe 2/3' [6]

0/5' strojevi – po svim osima se giba stol sa obratkom, a alat je fiksiran u prostoru. Ova konstrukcija je najbolje iskorištena prilikom obrade relativno malih obradaka.

4/1' strojevi – po četiri osi se giba alat, a po jednoj osi se giba obradak. Kod ovih strojeva postoje dvije mogućnosti: os kojom se giba obradak može biti rotacijska (R') ili translacijska (T').

1/4' strojevi – jednom osi giba se alat, a po četiri osi giba se obradak. Ovdje su također dvije mogućnosti, da se alat giba osima R ili T.

3/2' strojevi – po tri osi giba se alat, a po dvije osi giba se obradak. Ovdje postoje mogućnosti da se obradak giba po osima T'T' ili R'R' ili može biti kombinacija T'R'. Ovakvi strojevi omogućuju obrade velikih obradaka ali je konstrukcija stroja povezana s gibanjem alata komplicirana. Najčešće se koristi kombinacija gdje su obje osi kojima se giba obradak rotacijske.

2/3' strojevi – po dvije osi giba se alat, a po tri osi giba se obradak. Ovdje također postoje tri kombinacije osi kojima se giba alat: RR, TT i RT.

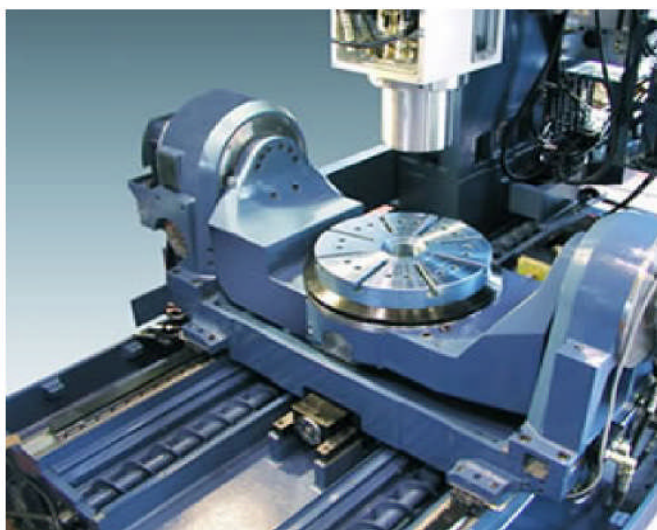
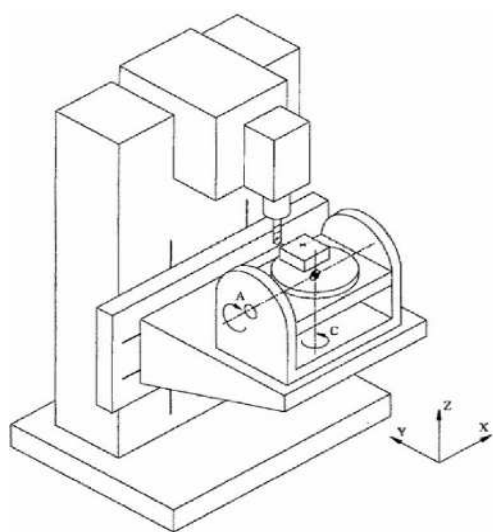
5.2 Klasifikacija strojeva prema lokaciji rotacijskih osi

Petoosni strojevi mogu se klasificirati prema mjestu na kojem se nalaze rotirajuće osi stroja. Tu se uzima u obzir da li se rotirajućim osima giba alat ili obradak. Moguće konfiguracije za strojeve sa dvije rotirajuće osi su:

- obje rotacijske osi nalaze se na vretenu – RR strojevi;
- obje rotacijske osi nalaze se na stolu obratka – R'R' strojevi;
- jedna rotacijska os nalazi se na vretenu, a druga na stolu – R'R strojevi.

R' R' strojevi – obje se rotacijske osi nalaze na stolu, a alat može biti fiksiran u prostoru ili može sadržavati od jedne do tri translacijske osi, *Slika 13*. Prednosti ovih strojeva su:

- u slučaju horizontalne izvedbe glavnog vretena optimalno odstranjivanje odvojenih čestica izvodi se uz pomoć gravitacije na način da ona jednostavno pada na podlogu;
- os alata tijekom obrade uvijek je paralelna sa Z osi stroja. Na taj se način obrada prilikom određene orijentacije alata uvijek vrši u XY ravnini, tako da se zadane funkcije izvode u jednostavnom troosnom modu;
- kompenzacija duljine alata izvodi se cijelo vrijeme u NC upravljačkom računalu stroja kao kod troosnih strojeva.



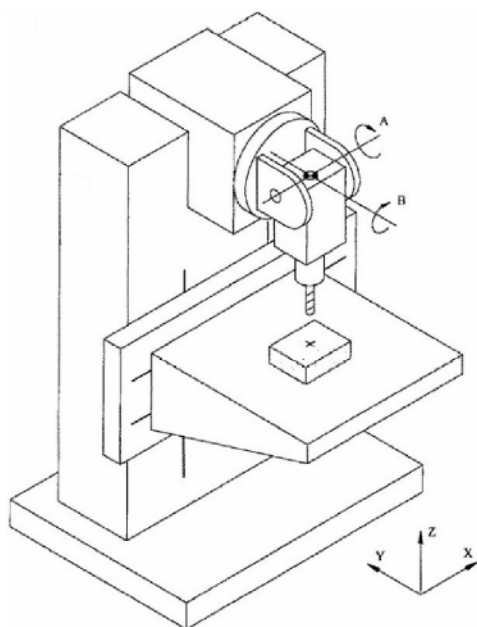
Slika 14. Konceptija stroja sa obje rotacijske osi na obradnom stolu [6]

Nedostaci ove izvedbe su:

- strojevi s rotacijskim stolom su uvijek namijenjeni obradcima ograničenih dimenzija;
- radni prostor alata je zbog nagiba alata često smanjen (po X,Y i Z osima);
- transformacija kartezijskih CAD/CAM koordinata pozicije alata u odnosu na koordinate osi stroja je ovisna o poziciji obratka na stolu. To znači da ukoliko se položaj obratka na stolu promijeni, transformacija osi NC programa se ne može provesti automatski nego je potrebno ponovo generirati cijeli kod.

Neke važne značajke primjene strojeva ovog tipa su:

- omogućena je obrada elektroda i ostalih obradaka sa svih strana;
- moguća je obrada dijelova koji zahtijevaju veliku preciznost;
- moguća je obrada turbina i profila za gume vozila zakretanjem alata za određeni kut. Tu je moguće izvoditi obrade koje se sastoje od istih značajki tako da se programira obrada jednog inkrementa, pa se za ostale inkremente koristi isti program s tim da se samo alat zakrene ili pomakne za određeni kut ili udaljenost.



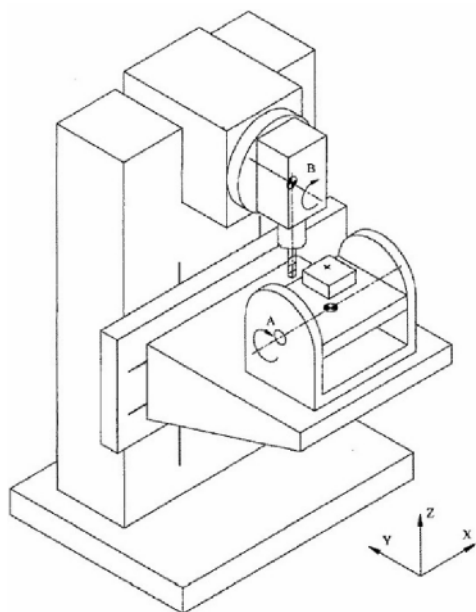
Slika 15. Konceptija stroja sa obje rotacijske osi na glavnom vretenu [6]

RR strojevi – obje rotacijske osi nalaze se na glavnom vretenu, *Slika 14*. Ovdje su česte izvedbe gdje se rotacijske osi sijeku u jednoj točki, što značajno pojednostavljuje obrađivanje podataka i izračun za upravljačka računala. Prednosti ovih strojeva su:

- moguća je obrada velikih obradaka;
- vrijednosti X,Y,Z osi stroja u NC programu ovise jedino o duljini alata. Tako se ishodište koordinatnog sustava obratka u slučaju novog stezanja može podesiti jednostavnom translacijom.

Nedostaci ove izvedbe su:

- kompleksan pogon glavnog vretena;
- smanjena krutost iz razloga što rotacijska os vretena ograničava prijenos sile. Kod brzina vrtnje od preko 5000 °/min dolazi do djelovanja kontra momenta izazvanog žiroskopskim efektom;
- kružna interpolacija u proizvoljno izabranoj ravnini, kao i ciklusi bušenja u proizvoljnoj orijentaciji često nisu mogući;
- promjene u duljini alata ne mogu se izvesti translacijama koordinatnih sustava kojih bi se podaci prenijeli u upravljačko računalo stroja, nego je potrebno ponovo generirati NCKod.



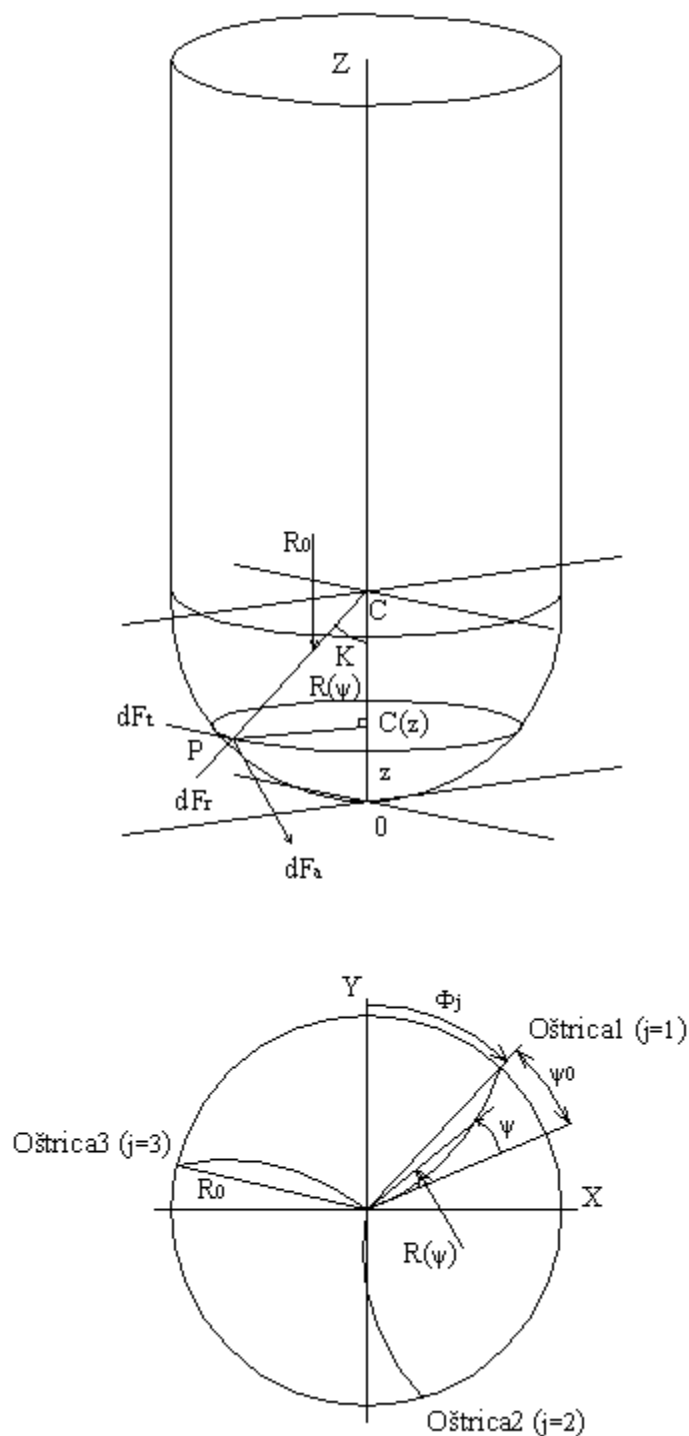
Slika 16. Konceptija stroja sa rotacijskim osima na glavnom vretenu i na stolu [6]

Značajna područja primjene ovih strojeva su obrade svih tipova velikih obradaka, kao npr. krila zrakoplova i trupovi brodova.

RR' strojevi – po jedna rotacijska os nalazi se na glavnom vretenu i na stolu, *Slika 15*. Iako na tržištu postoji veliki broj strojeva ovakve izvedbe, oni sadrže nedostatke obiju prijašnjih grupa, te se koriste sa obradu isključivo manjih obradaka. Područje primjene im je gotovo jednako kao u strojeva sa rotacijskim osima na stolu.

6 KINEMATIČKI MODEL

6.1 Geometrija prstastog glodala sa oblim vrhom kod 3-osnog glodanja



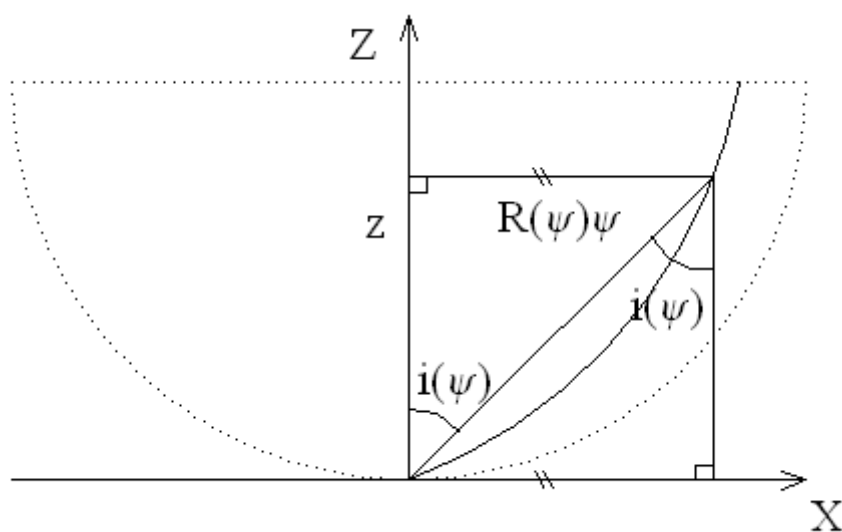
Slika 17. Geometrija prstastog glodala s oblim vrhom [2]

Detaljna geometrija prstastog glodala sa oblim vrhom je prikazana na *Slici 17*. Cartesian koordinatni sustav XYZ je postavljen u vrhu glodala. Z os je postavljena okomito na površinu koja se obrađuje, X os je kolinearna sa smjerom obrade, a Y os je okomita na XZ.

Aksijalni položaj točke na reznom rubu alata je definiran pomoću tri parametra: kut zaostajanja ψ (*lag angle*), z i K . Oni mogu biti zapisani, u ovisnosti jedan o drugome, na sljedeći način:

$$z = \frac{R(\psi)\psi}{\tan i(\psi)} = R_0(1 \cos K) \quad (1)$$

gdje je $R(\psi)$ radijus dodirne točke (lokalni radijus), $i(\psi)$ je kut spirale u dodirnoj točki (*Slika 18*) i K je kut definiran na *Slici 17* i *Slici 20*.



Slika 18. Definicija kuta spirale [2]

Za rezne alate koji imaju konstantnu dužinu nagiba, na bilo koje dvije točke na reznom rubu, vrijedi sljedeća relacija:

$$\frac{z_1}{\psi_1} = \frac{z_2}{\psi_2} \quad (2)$$

Nakon uvrštavanja iz (1) i (2) dobijemo :

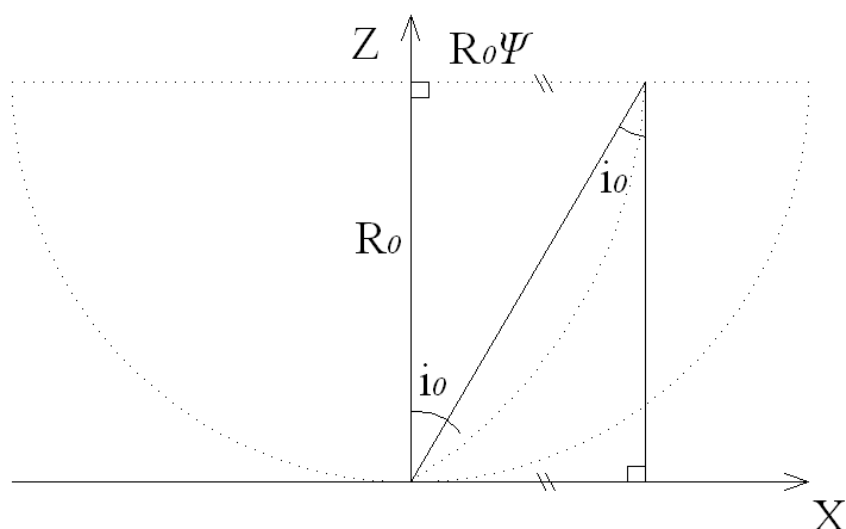
$$\frac{R(\psi_1)}{\tan i(\psi_1)} = \frac{R(\psi_2)}{\tan i(\psi_2)} = \frac{R_0}{\tan i_0} \quad (3)$$

Ako preuredimo izraz u jednadžbi (3), vidimo da je lokalni kut spirale uvećan za faktor radijusa i može biti izražen u ovisnosti od i_0 , gdje je i_0 kut kose linije granice gdje se spajaju oštrica reznog alata i držača alata:

$$\tan i(\psi) = \tan i_0 \frac{R(\psi)}{R_0} \quad (4)$$

Jednadžba (1) sad može biti definirana tako da jedine varijable u njoj budu kut spirale ψ i z (Slika 19)

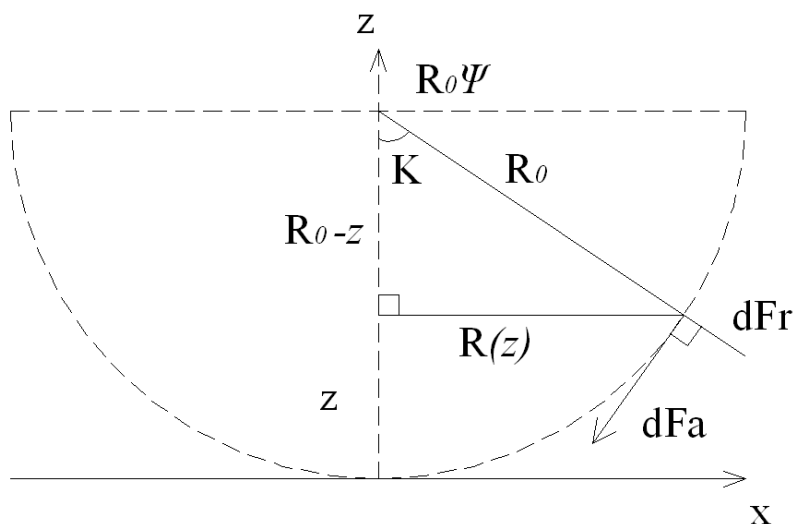
$$z = \frac{R_0}{\tan i_0} \psi \quad (5)$$



Slika 19. Veza z i ψ u odnosu na R_0 i i_0 [2]

Radijus dodirne točke glodala se mijenja sa aksijalnom udaljenosti od vrha glodala. Kod $z=0$ (vrh glodala) radijus dodirne točke je jednak nuli pa je s obzirom na to, u toj točki $z=R_0$.

Koristeći geometrijske relacije u trokutu (Slika 20), radijus dodirne točke može biti izražen na sljedeći način :



Slika 20. Promjena radijusa dodirne točke alata u ovisnosti na aksijalnu udaljenost [2]

$$R(z) = \sqrt{R_0^2 - (R_0 - z)^2} \quad (6)$$

Koristeći jednačbe (5) i (6) radijus dodirne točke može biti izražen preko kuta zaostajanja na sljedeći način:

$$R(\psi) = R_0 \sqrt{1 - (\psi \cot i_0 - 1)^2} \quad (7)$$

Vektor r je nacrtan iz centra kuglastog glodala do točke P na reznom rubu alata sa *Slici 17*:

$$R(\psi) = OP - OC \quad (8)$$

$$OP = \begin{pmatrix} R(\psi) \sin \phi_j \\ R(\psi) \cos \phi_j \\ R_0 \psi \cot i_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$OC = R_0 k \quad (10)$$

Iz jednačbi (8) - (10) slijedi:

$$r(\psi) = \begin{pmatrix} R(\psi) \sin \phi_j \\ R(\psi) \cos \phi_j \\ R_0 (\psi \cot i_0 - 1) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Dužina infinitezimalnog zaobljenog reznog ruba uzduž kuglastog dijela računa se pomoću:

$$dS = \|dr\| = \sqrt{R'(\psi)^2 + R^2(\psi) + R_0^2 \cot^2 i_0 d\psi} \quad (12)$$

$R'(\psi)$ je derivacija od $R(\psi)$

$$R'(\psi) = \frac{-R_0(\psi \cot i_0 - 1) \cot i_0}{\sqrt{1 - (\psi \cot i_0 - 1)^2}} \quad (13)$$

Kut uranjanja ϕ_j definira kutnu orijentaciju točke na reznom rubu longitudinalne osi kuglastog glodala, mjeren od +y smjera kako je prikazano na *Slici 17*:

$$\begin{aligned} \phi_j &= \phi_{ref} + (j-1) * \phi_p - \frac{\tan i_0}{R_0} * z \\ &= \phi_{ref} + (j-1) * \phi_p - \psi \\ &= \phi_{ref} + (j-1) * \phi_p - \tan i_0 * (1 - \cos K) \end{aligned} \quad (14)$$

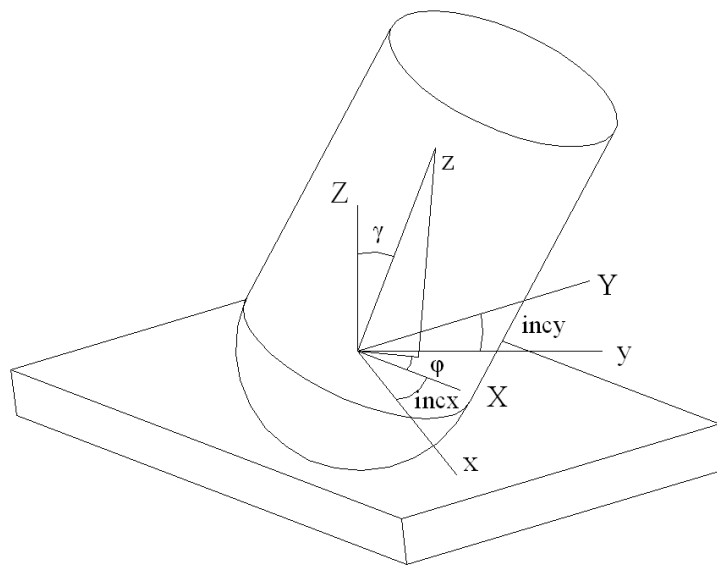
gdje je:

$$\phi_p = \frac{2\pi}{n} \quad \text{i}$$

$$\sin K = \frac{R(z)}{R_0} = \frac{R(\psi)}{R_0} \quad (Slika 20) \quad (15)$$

6.2 Geometrija prstastog glodala sa oblim vrhom kod 5-osnog glodanja

Kod 5-osnog glodanja postoje još dva dodatna parametra. Prvi je kut valjanja koji je rotacija reznog alata oko osi okomite na os posmaka (smjer obrade). Drugi je kut poniranja koji je nagib reznog alata oko osi posmaka (smjer obrade). U ovom modelu korištena su dva koordinatna sustava: koordinatni sustav radnog komada (WCS) XYZ i koordinatni sustav reznog alata (TCS) xyz. Smjer obrade se uzima u smjeru osi X, Z osa je vertikalna a Y os je određena pravilom desne ruke. U koordinatnom sustavu reznog alata z os je u smjeru nagiba reznog alata. [2]



Slika 21. XYZ (WCS) i xyz (TCS) ilustracija koordinatnih sustava [2]

Jedinični vektor duž osi alata s obzirom na XYZ koordinatni sustav kod 3-osnog glodanja je:

$$x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Nakon rotacije reznog alata za kutove valjanja i poniranja nagiba kod 5-osnog glodanja rezultirajući jedinični vektor y u XYZ može biti određen na sljedeći način:

$$y = T * x$$

Transformacijska matrica T od x do y je definirana sa :

$$T = \begin{pmatrix} \cos(lead) & 0 & \sin(lead) \\ \sin(lean) * \sin(lead) & \cos(lean) & -\sin(lean) * \cos(lead) \\ -\cos(lean) * \sin(lead) & \sin(lean) & \cos(lean) * \cos(lead) \end{pmatrix} \quad (18)$$

i

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_3 * \tan(incx) \\ -y_3 * \tan(incy) \\ y_3 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$Y_3 = \cos^{-1}(\gamma) \quad (20)$$

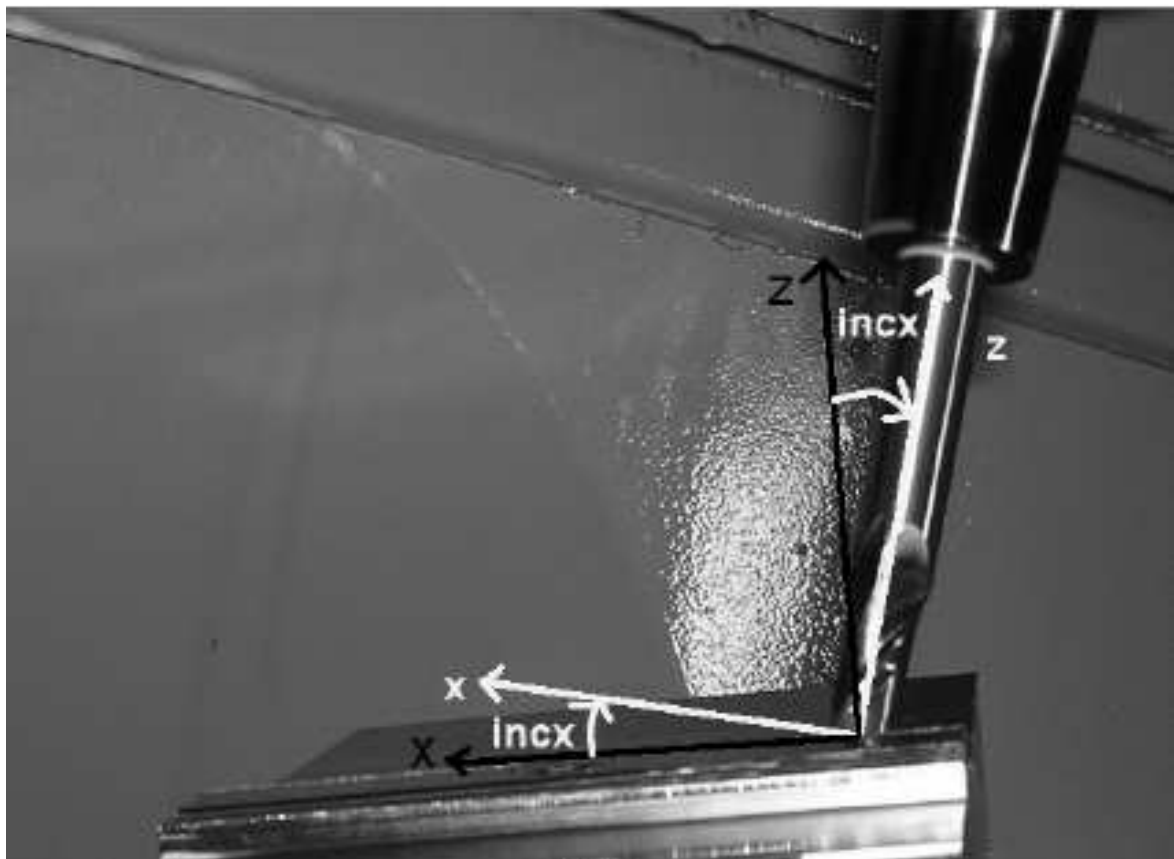
γ je kut između Z i z osi (Slika 21)

$$incx = \tan^{-1}\left(\frac{y_1}{y_3}\right) \quad (21)$$

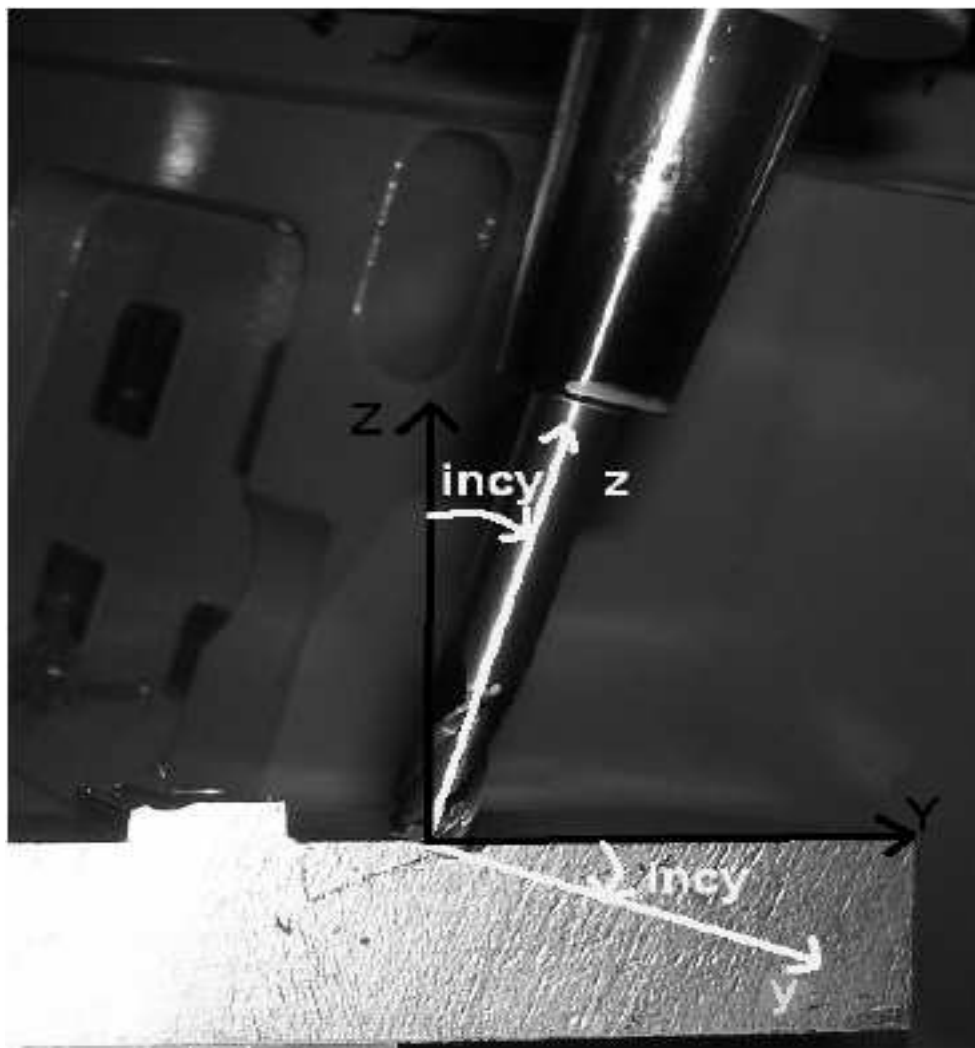
$$incy = -\tan^{-1}\left(\frac{y_2}{y_3}\right)$$

$incx$ je kut nagiba osi X nakon što je os alata projektirana na XZ ravninu, $incy$ je kut nagiba osi Y nakon što je os alata projektirana na YZ ravninu. $incx$ je kut između x osi i X osi u XZ ravnini.

Analogno vrijedi i za $incy$, to je kut između osi y i osi Y u YZ ravnini (Slika 21, 22, 23).



Slika 22. Prikaz vrijednosti incx [2]



Slika 23. Prikaz vrijednosti incy [2]

Sile rezanja se prvo računaju u TCS i onda se transformiraju u WCS pomoću sljedeće transformacijske matrice:

$$T_{back} = \begin{pmatrix} \cos(incx) & 0 & \sin(\gamma) * \cos(\varphi) \\ 0 & \cos(incy) & \sin(\gamma) * \sin(\varphi) \\ -\sin(incx) & \sin(incy) & \cos(\gamma) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{pmatrix} = T_{back} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (22)$$

gdje je:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{y_2}{y_1}\right) \quad (\text{Slika 5}) \quad (23)$$

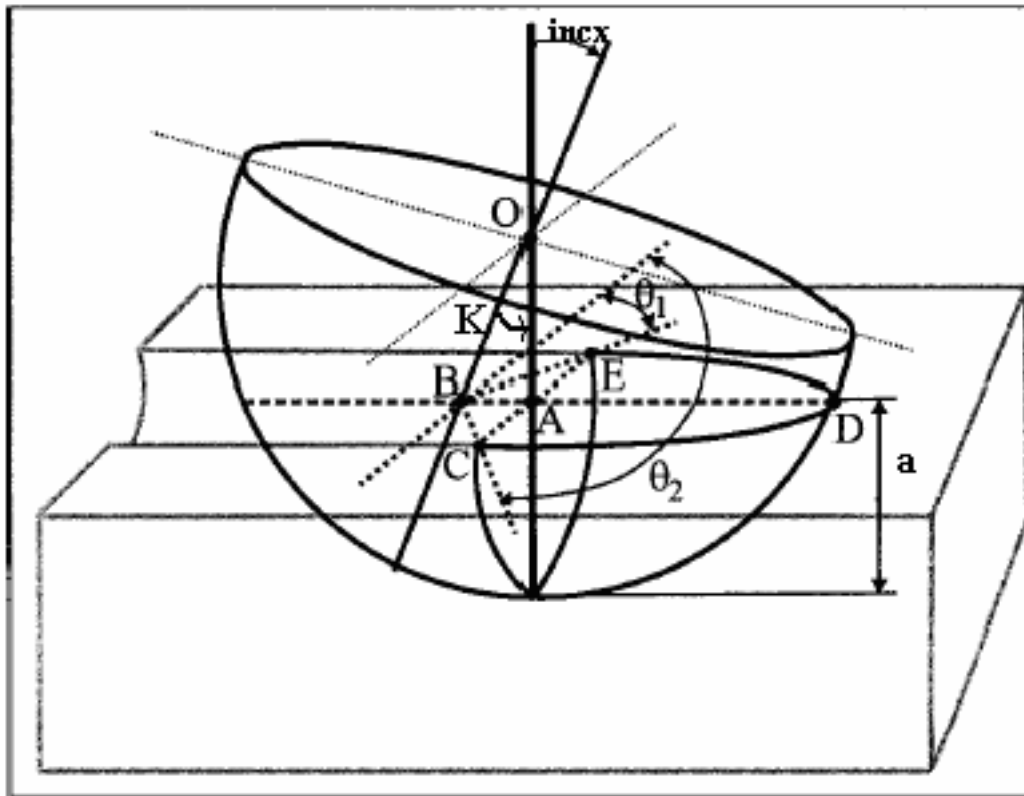
7 GRANICE OBRADE

7.1 Ulazni i izlazni kutovi kod 5-osnog glodanja

Granice dubine uranjanja glodala kod 5-osnog glodanja, odnosno obrađeno područje u zahvatu glodala, mijenja se u ovisnosti od kuta nagiba glodala. (Slika 24)

$$\tan \theta_1 = \frac{\overline{AB}}{\overline{AE}} = \frac{(R_0 - a) * \tan(\text{incx})}{\sqrt{R_0^2 - (R_0 - a)^2}} \quad (24)$$

gdje je a dubina uranjanja glodala a R_0 radijus kuglastog glodala. Ulazni i izlazni kutovi, za navedenu geometriju alata i način glodanja, mogu se izraziti na sljedeći način:



Slika 24. Učinak nagiba glodala na ulazne i izlazne kutove [2]

Za "glodanje prema gore" ulazni i izlazni kutovi se mogu izraziti na sljedeći način:

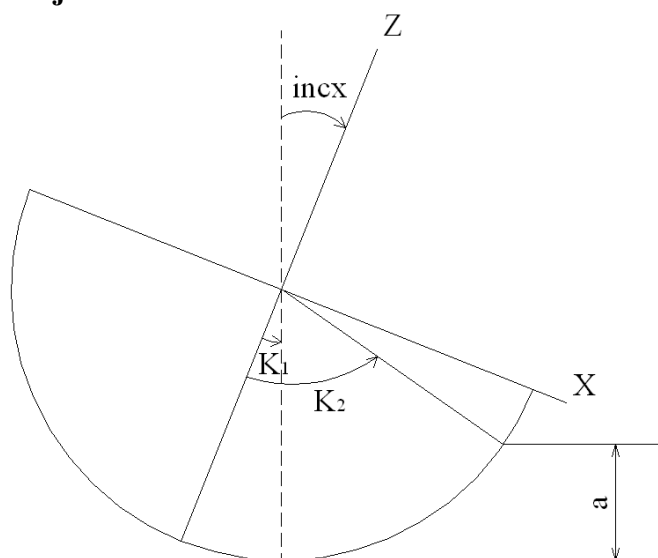
$$\begin{aligned}\varphi_{start} &= \theta_1 \\ \varphi_{izlaz} &= \cos^{-1}\left(1 - \frac{b}{R_0}\right) - \theta_1\end{aligned}\quad (25)$$

Slično vrijedi i za "glodanje prema dolje" :

$$\begin{aligned}\varphi_{start} &= \pi - \cos^{-1}\left(1 - \frac{b}{R_0}\right) + \theta_1 \\ \varphi_{izlaz} &= \pi - \theta_1\end{aligned}\quad (26)$$

Gdje b predstavlja radijalnu dubinu rezne površine. [2]

7.2 Područje djelovanja

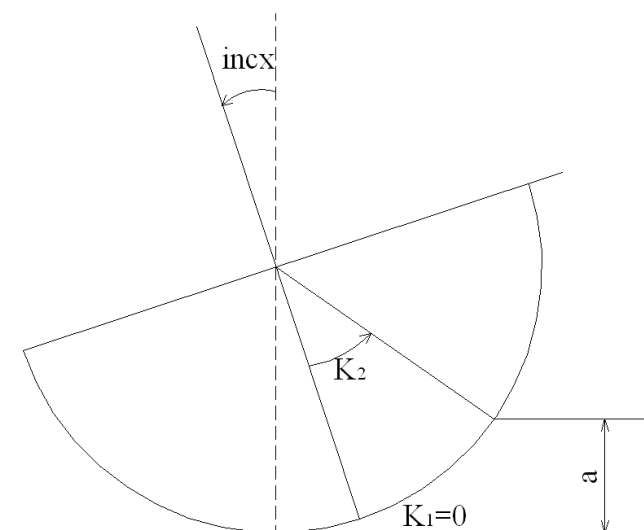


Slika 25. Područje djelovanja za $\text{incx} > 0$ slučaj [2]

K_1 donje područje djelovanja i K_2 gornje područje djelovanja su mjereni od osi reznog alata kako je prikazano na Slici 25 i 26.

$$K_1 = \begin{cases} incx & \text{za } incx \geq 0 \\ 0 & \text{za } incx < 0 \end{cases} \quad (27)$$

$$K_2 = incx + \cos^{-1}\left(1 - \frac{a}{R_0}\right) \quad (28)$$



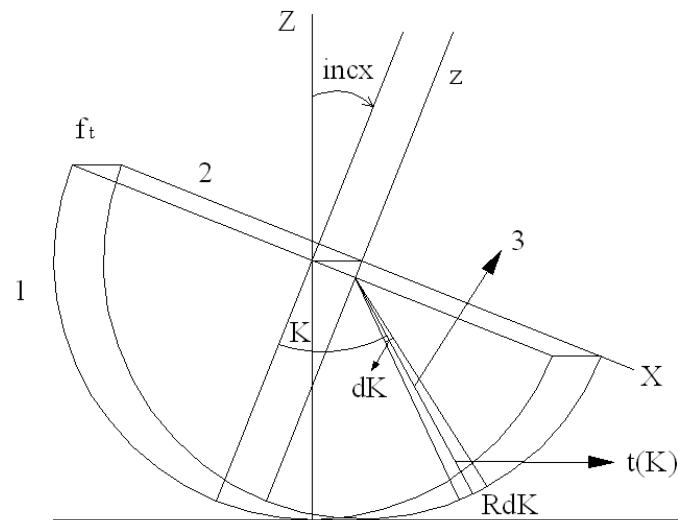
Slika 26. Područje djelovanja za $incx < 0$ slučaj [2]

7.3 Model određivanja debljine odvojene čestice

Debljina odvojene čestice kod kuglastog glodala se može približno odrediti na sljedeći način:

$$t(\varphi_j, K) = t(K) \cdot \sin \varphi_j \quad (29)$$

gdje je ϕ_j kut nagiba. $t(K)$ je određen mapiranjem kuglastog glodala na XZ ravnini. Jednadžbe mapiranih geometrijskih identiteta, polu-krug 1, polu-krug 2 i linija 3 su korišteni da se izračuna debljina odvojene čestice na XZ ravnini (Slika 27). [2]



Slika 27. Prikaz $t(K)$ [2]

8 SILE REZANJA

Sile rezanja su razdvojene na rubne i zajedničke rezne komponente.

$$\begin{aligned}
 dF_{rj}(\phi_j, K) &= K_{re}dS + K_{rc} * t(\phi_j, K) * dB \\
 &= K_{re}dS + K_{rc} * t(K) \sin \phi_j * RdK \\
 dF_{tj}(\phi_j, K) &= K_{te}dS + K_{tc} * t(\phi_j, K) * db \\
 &= K_{te}dS + K_{tc} * t(K) \sin \phi_j * Rd \\
 dF_{aj}(\phi_j, K) &= K_{ae}dS + K_{ac} * t(\phi_j, K) * db \\
 &= K_{ae}dS + K_{ac} t(K) \sin \phi_j * RdK
 \end{aligned} \tag{30}$$

Rubni koeficijenti sile rezanja K_{re} , K_{te} i K_{ae} su u N/mm jer su koeficijenti sile rezanja K_{rc} , K_{tc} i K_{ac} u Mpa. Sile rezanja u tangencijalnom, radijalnom i aksijalnom smjeru su transformirane u xyz smjeru preko transformacije T_{xyz} :

$$T_{xyz} = \begin{pmatrix} \sin K * \sin \phi_j & -\cos \phi_j & -\cos K * \sin \phi_j \\ -\sin K * \cos \phi_j & \sin \phi_j & -\cos K * \cos \phi_j \\ \cos K & 0 & -\sin K \end{pmatrix} \tag{31}$$

$$\begin{pmatrix} dF_{xj}(\phi_j, K) \\ dF_{yj}(\phi_j, K) \\ dF_{zj}(\phi_j, K) \end{pmatrix} = T_{xyz} \begin{pmatrix} dF_{rj}(\phi_j, z) \\ dF_{tj}(\phi_j, z) \\ dF_{aj}(\phi_j, z) \end{pmatrix}$$

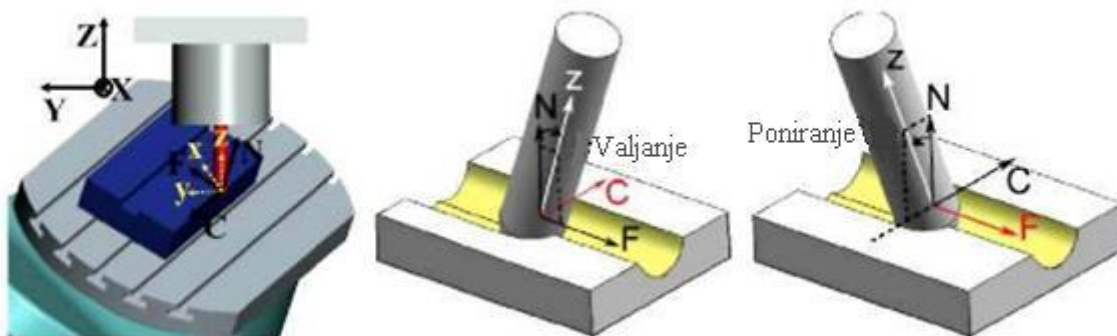
Rezne sile u koordinatnom sustavu reznog alata su integrirane preko zone djelovanja da se pronađu ukupne sile u xyz smjerovima. Ove sile se zatim transformiraju u WCS preko transformacijske matrice T_{back} kako je prikazano u jednadžbi (22). [2]

9 RADNA GEOMETRIJA

9.1 Koordinatni sustavi, kutovi valjanja i poniranja

Geometrija kod 5-osnih operacija glodanja može biti modelirana koristeći tri koordinatna sustava kako je prikazano na Slici 28. Prvi je fiksni koordinatni sustav, WCS, ili koordinatni sustav radnog komada, koji se sastoji od X, Y, i Z osi. Drugi koordinatni sustav je radni koordinatni sustav, FCN, koji se sastoji od posmaka (F) (*feed*), os okomita na os posmaka (C) (*cross-feed*) i os okomita na površinu (N). TCS koordinatni sustav je koordinatni sustav dobiven rotacijom FCN koordinatnog sustava. U TCS koordinatnom sustavu os alata je (z) os koordinatnog sustava dok su (x) i (y) osi u poprečnim smjerovima reznog alata.

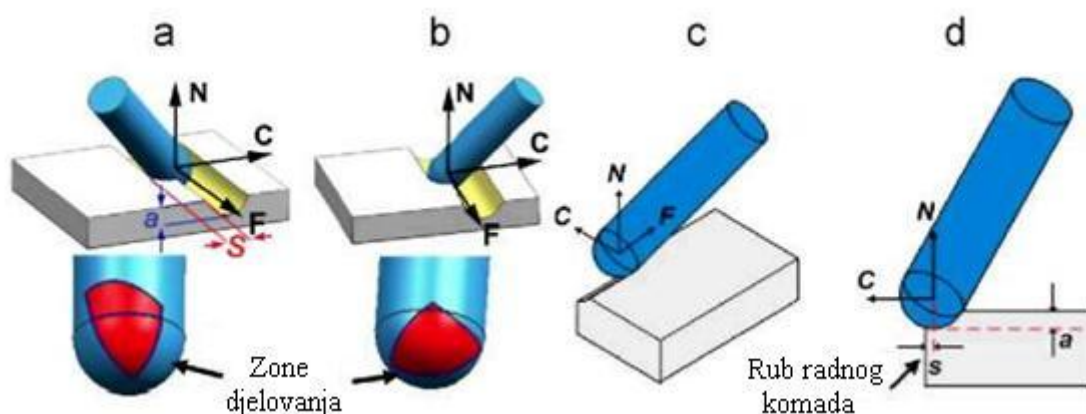
Kod 5-osnog glodanja, orijentacija alata je određena kutovima valjanja i poniranja koji su izmjereni u odnosu na os okomitu na površinu (N) kako je prikazano na Slici 28. Kut valjanja je kut zakretanja osi alata oko osi okomite na os posmaka (C), a kut poniranja je zakretanje osi alata oko osi posmaka (F). [1]



Slika 28. Koordinatni sustavi i kutovi valjanja i poniranja [1]

9.2 Zone djelovanja

Zona djelovanja alata, odnosno područje reznog alata koje je u dodiru sa radnim komadom, zavisi od kutova valjanja i poniranja, geometrije kuglastog glodala i dubine rezanja. Učinak kutova valjanja i poniranja na područja zahvata alata prikazuje *Slika 29* za dvije različite kombinacije kutova valjanja i poniranja.



Slika 29. (a) Područja zahvata reznog alata za pozitivni kut valjanja (15) i pozitivni kut poniranja (40), (b) za pozitivni kut valjanja (15) i negativni kut poniranja (-40), (c) slučaj prvog reza; 3D pogled i (d) 2D pogled na ravninu CN [1]

Dubina rezanja (a) je udaljenost između najniže točke alata i gornje površine radnog komada u smjeru okomice na površinu (N) kako je prikazano na *Slici 29* (a) i (d). Aksijalni pomak (s) je udaljenost između usporednih reznih koraka u osi okomitoj na smjer posmaka (C) (*Slika 29(a)*). Smjer okomit na smjer posmaka (*Cross-feed*) je smjer neobrađenog materijala u smjeru (C) osi. Ako je neobrađeni materijal u smjeru pozitivne (C) osi, C smjer je pozitivan, u protivnom je negativan.

Za slučaj prvog reza, aksijalni pomak je udaljenost, u smjeru osi (C), od ruba radnog komada do najniže točke reznog alata u smjeru osi (N) (*Slika 29(d)*). Stoga, ako je (C) koordinata radnog komada pozitivna, aksijalni pomak je negativan (*Slika 29(d)*), u protivnom je pozitivan. [1]

9.3 Visina neravnina

Visina neravnina, h_s je mjera površinske kvalitete za sljedeće slučajeve obrade:

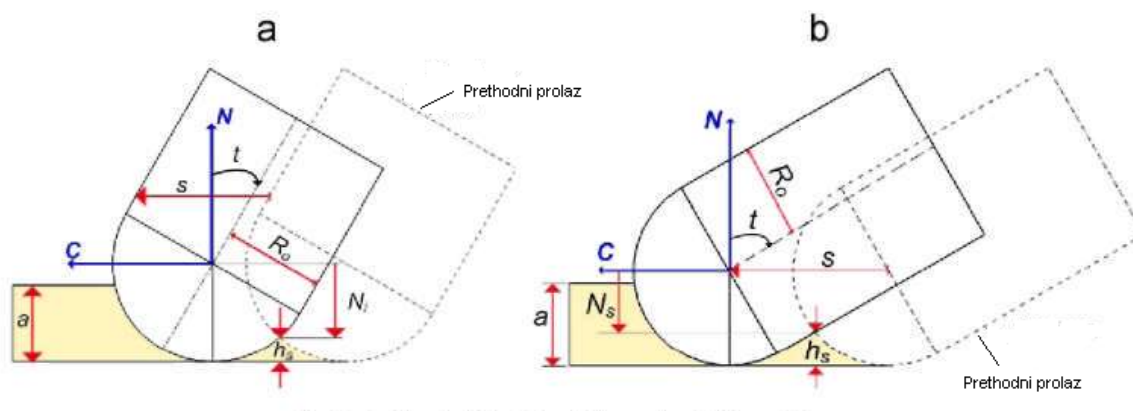
Kod 3-osne obrade kuglastim glodalom, h_s ovisi samo o radijusu kuglastog glodala i aksijalnom pomaku. Međutim, kod 5-osnog glodanja kuglastim glodalom može još ovisiti i o kutu valjanja i kutu poniranja. Ako je aksijalni pomak (s) niži od $2R_0 \cos t$, usporedne putanje reznog alata se susreću na dijelovima obrađenim kuglastim dijelom reznog alata (*Slika 30(a)*). S druge strane, ako je (s) veći od $2R_0 \cos t$, usporedne putanje alata se susreću na dijelovima obrađenim cilindričnim dijelom kuglastog glodala u jednom prolazu i kuglastim dijelom glodala u drugom prolazu, kao što je prikazano na *Slici 30(b)*. U prvom slučaju, visina neravnina ovisi samo o radijusu kuglastog glodala i aksijalnom pomaku. Međutim, u drugom slučaju, kut valjanja također utječe na rezultirajuću visinu neravnina. Visine neravnina za svaki slučaj su dane sljedećim izrazima:

$$h_s = \begin{cases} R_0 - N_i, & \text{ako je } s < 2R_0 \cos t \\ R_0 - N_s, & \text{ako je } s > 2R_0 \cos t \end{cases} \quad (32)$$

gdje su N_i koordinate presjeka kuglastih dijelova glodala u slučaju kao na *Slici 30(a)*, dok su N_s koordinate presjeka cilindričnog i kuglastog dijela glodala u slučaju kao na *Slici 30(b)*.

$$N_i = -\sqrt{R_0^2 - \frac{s^2}{4}} \quad (33)$$

$$N_s = -\sqrt{R_0^2 - (R_0 - s \cos t)^2} - \cos t - (R_0 - s \cos t) \sin |t|$$



Slika 30. Visina neravnina : (a) $s < 2R_0 \cos t$ i (b) $s > 2R_0 \cos t$ [1]

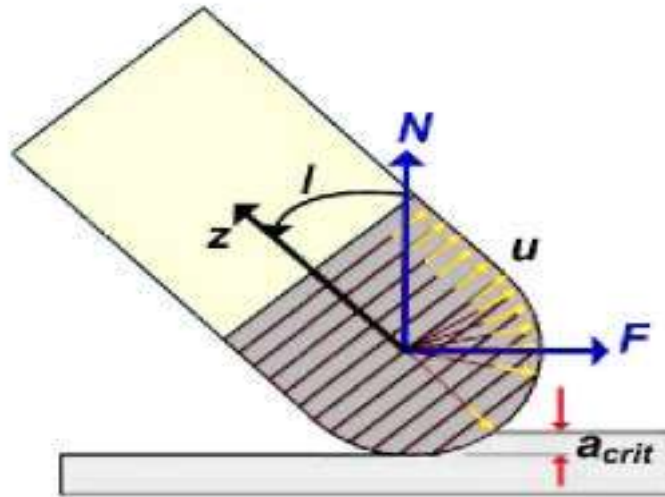
U drugom slučaju, povećavajući kut valjanja, moguć je veći aksijalni pomak za iste zahtjeve visine neravnina na površini radnog komada. Rezultat toga je smanjenje ukupnog broja reznih putanja alata, što na kraju rezultira smanjenjem vremena rada stroja. [1]

10 UČINCI KUTOVA VALJANJA I PONIRANJA NA PROCES

Kutovi valjanja i poniranja glodala imaju učinak na različite faktore, kao što je kontakt vrha kuglastog glodala sa radnim komadom, visinu neravnina, sile rezanja, obrtnu silu, greške površine i stabilnost procesa. U sljedećem poglavlju ćemo pobliže opisati navedene učinke.

10.1 Uvjeti i izbjegavanje kontakta vrha prstastog glodala sa oblim vrhom sa površinom radnog komada

U slučajevima gdje je vrh glodala u kontaktu sa površinom radnog komada, rezanje ne može biti izvršeno jer je brzina rezanja u vrhu glodala jednaka nuli. Umjesto rezanja, glodalo ulazi u radni komad i *probija* se kroz radni komad, što također ovisi o kutu nagiba glodala. Kad je kut valjanja negativan, vektor posmaka ima negativnu komponentu normalnog vektora reznog alata (u) u vrhu alata. Kontakt koji je ostvaren između reznog alata i radnog komada, u kojem je brzina rezanja jednaka nuli, rezultira stvaranjem novih, dodatnih sila. Iako je vrh glodala u kontaktu sa površinom radnog komada, u ovom slučaju negativnog kuta valjanja, vrh glodala nije u kontaktu sa obrađenim dijelom površine, pa tako nema tragova vrha koje je ostavio vrh glodala na obrađenoj površini. S druge strane, kad je kut valjanja jednak nuli vrh glodala se probija kroz obrađenu površinu. Ovo probijanje kroz površinu ostavlja, pogotovo kod mekših materijala kao što je aluminij, tragove vrha glodala na rezultirajućoj površini. S obzirom na navedeno, bilo to radi dodatnih sila koje se stvaraju ili radi tragova koje stvara vrh glodala na rezultirajućoj površini, kontakt između vrha glodala i površine radnog komada treba se izbjeći kad god je to moguće. [1]



Slika 31. Slučaj negativnog kuta valjanja [1]

Vektor pozicije vrha glodala (F_t , C_t , N_t) u FCN koordinatnom sustavu je definiran na sljedeći način :

$$\begin{pmatrix} F_t \\ C_t \\ N_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_0 \sin l \\ R_0 \cos t \cos l \\ -R_0 \cos t \cos l \end{pmatrix} \quad (34)$$

gdje je R_0 radijus kuglastog glodala a l je kut valjanja. Do kontakta između vrha glodala i površine radnog komada može doći samo ako kut valjanja nije pozitivan, tako da se takav nagib glodala mora izbjeći ako je to moguće, iako se takav nagib glodala, u nekim slučajevima, mora koristiti zbog pristupačnosti glodala nekim dijelovima radnog komada. U takvim uvjetima obrade, kontakt između vrha glodala i površine radnog komada se može eliminirati tako da se dubina rezanja drži manja od kritične dubine rezanja a_{crit} , kako je pokazano na *Slici 31*. Kritična dubina rezanja zavisi od (N) komponente vektora pozicije vrha glodala, N_t , a ona se računa prema sljedećem izrazu:

$$a_{crit} = R_0 (1 - \cos t \cos l) \quad (35)$$

Ako je potrebna dubina rezanja veća od kritične dubine rezanja, kontakt vrha glodala i površine radnog komada se može izbjeći ako su aksijalni pomak te kutovi valjanja i poniranja određeni na pravi način. Uvjeti za izbjegavanje kontakta vrha glodala i površine radnog komada su opisani na sljedeći način.

U uvjetima prvog reza, postoje dvije različite situacije o ovisnosti od (C) smjera (*Slika 21*). *Slika 32(a)* prikazuje slučaj gdje je (C) smjer pozitivan, dok je na *Slici 32(b)* prikazan negativni smjer osi (C). U oba slučaja kutovi valjanja i poniranja su negativni. Osjenčana područja na slikama označavaju područja reznog alata i radnog komada koja su u kontaktu. Sljedeći izrazi, koji su određeni iz geometrije, trebali bi određivati uvijete da se izbjegne kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada u slučaju prvog reza:

$$\left. \begin{aligned} s &< -R_0 \sin t \cos l \\ s &> -R_0 \sin t \cos l \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{ako je (C) smjer pozitivan} \\ &\text{ako je (C) smjer negativan} \end{aligned} \quad (36)$$

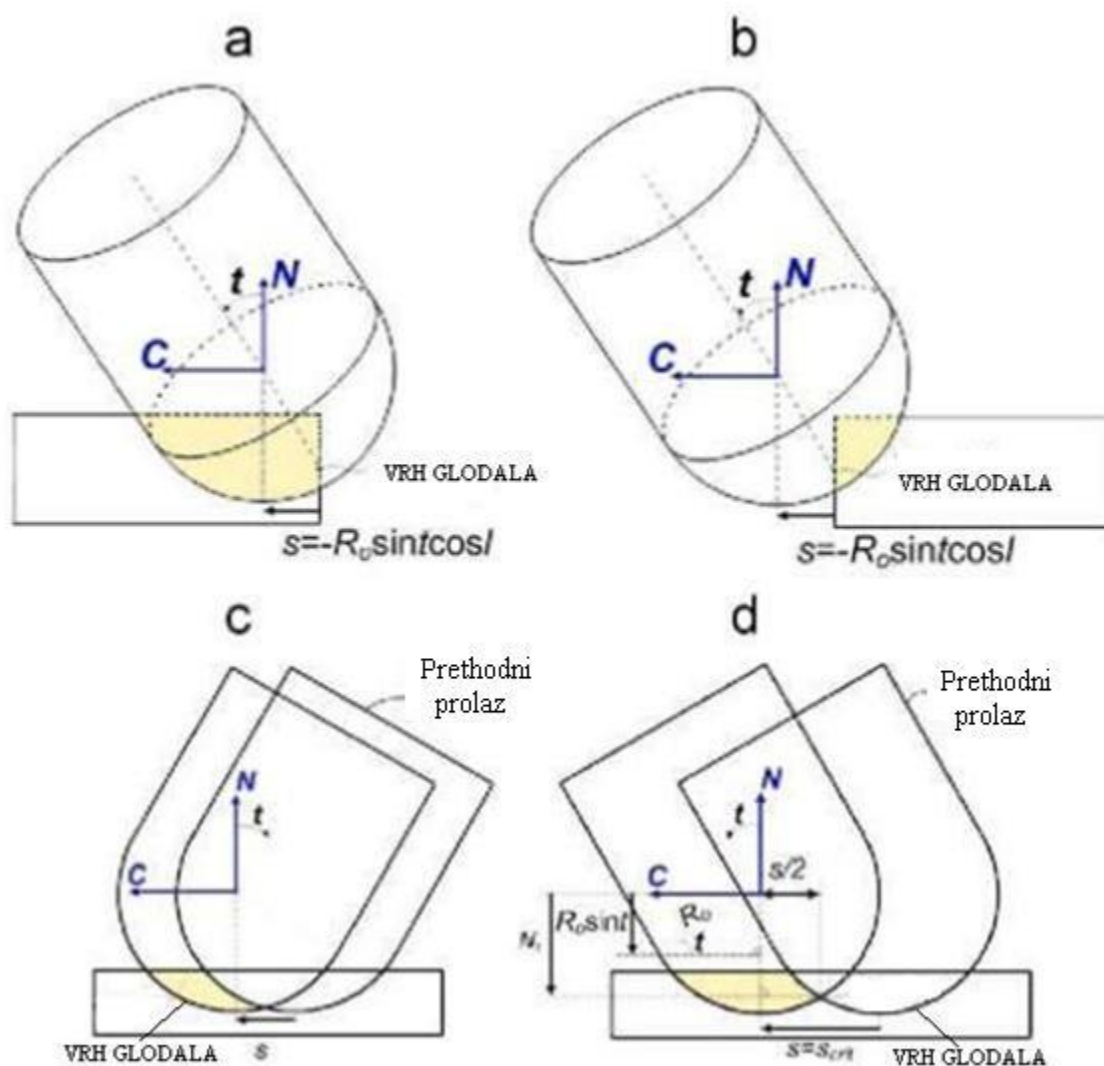
U sljedećim slučajevima kut valjanja nije pozitivan, a dubina rezanja je veća od kritične dubine rezanja, vrh glodala je definitivno u kontaktu sa površinom radnog komada u oba (C) smjera i kut valjanja je ili pozitivan ili negativan. Slično, kontakt vrha glodala i površine radnog komada se ne može izbjeći ako je kut valjanja jednak nuli. Na *Slici 32(c)*, (d) kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada je ilustriran za slučaj gdje su smjer (C) i kut valjanja pozitivni. S druge strane, kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada se može izbjeći ako smjer (C) i kut valjanja imaju suprotan predznak, a aksijalni pomak je izabran na odgovarajući način, kako je prikazano na *Slici 32(d)*. Kako je prikazano na slici, vrh glodala nije u kontaktu sa površinom radnog komada jer je materijal, na mjestu gdje se nalazi vrh glodala, uklonjen u prethodnom prolazu. Za takve slučajeve, ako je aksijalni pomak manji od kritične vrijednosti s_{crit} vrh glodala je van reznog područja. Kritična vrijednost s_{crit} zavisi od smjera (C), kuta valjanja, kuta poniranja, aksijalnog pomaka i N koordinate vrha glodala, N_t . [1]

U slučajevima gdje je aksijalni pomak manji od $2R_0 \cos t$, ako je N koordinata vrha glodala N_t manja od N_i , vrh glodala je u kontaktu sa površinom radnog komada. U suprotnom, kontakt vrha glodala i površine radnog komada se može izbjeći birajući vrijednosti aksijalnog pomaka prema *Tablici 1*.

S druge strane, ako je aksijalni pomak veći od $2R_0 \cos t$, vrh glodala je u kontaktu sa površinom radnog komada ako je njegova N koordinata manja od N_s , a ako nije kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada se može eliminirati prilagođavanjem aksijalnog pomaka poštujući s_{crit} (*Tablica 1*). [1]

Tablica 1. s_{crit} vrijednost za navedene slučajeve

Smjer aksijalnog pomaka	Kut valjanja	Aksijalni pomak	N koordinata vrha glodala N_t	S_{crit}
Pozitivan	$t < 0$	$s < 2R_0 \cos t$	$N_i < N_t \leq R_0 \sin t$	$R_0 (\sqrt{1 - \cos^2 t} \cos^2 l - \sin t \cos l$
			$N_t > R_0 \sin t$	$\frac{R_0}{\cos t}$
		$s > 2R_0 \cos t$	$N_t > N_s$	$\frac{R_0}{\cos l}$
Negativan	$t > 0$	$s < 2R_0 \cos t$	$N_i < N_t \leq -R_0 \sin t$	$R_0 (\sqrt{1 - \cos^2 t} \cos^2 l - \sin t \cos l$
			$N_t > -R_0 \sin t$	$\frac{R_0}{\cos t}$
		$s > 2R_0 \cos t$	$N_t > N_s$	$\frac{R_0}{\cos t}$



Slika 32. (a) Izbjegavanje kontakta vrha glodala sa površinom radnog komada u slučaju prvog reza, (C) smjer pozitivan, (b) (C) smjer negativan, (c) kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada u slučaju uzastopnog reza, (C) smjer pozitivan, kut poniranja pozitivan i (d) kut poniranja negativan [1]

Kako je prezentirano, za slučaj prvog reza i uzastopnog reza, čak i ako kut valjanja nije pozitivan i ako je dubina rezanja veća od a_{crit} , kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada se može izbjeći pravilnim izborom aksijalnog pomaka kad su kutovi valjanja i poniranja fiksni. Ako je aksijalni pomak izabran prethodno, orijentacija glodala (kutovi valjanja i poniranja) se može odrediti na taj način da se izbjegne kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada. [1]

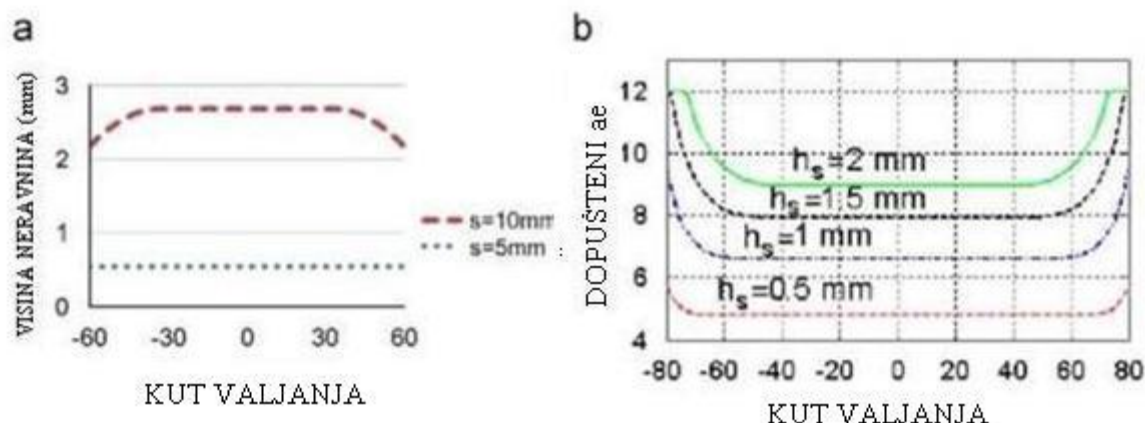
10.2 Visina neravnina

U operacijama završne obrade, aksijalni pomak je određen prema dopuštenoj visini neravnina na završnoj površini. Zadajući dopuštenu visinu neravnina, potrebni broj reznih putanja se može smanjiti povećavajući kut valjanja pod određenim uvjetima. Stoga, jako je važno ispuniti te uvjete i izabrati kut valjanja pravilno da bi se povećala produktivnost.

Za sljedeće slučajeve obrade, kut valjanja nema nikakav učinak na visinu neravnina ako je aksijalni pomak manji od $2R_{ocost}$. Ovo je, u globalu, slučaj za završne operacije gdje je vrijednost s izabrana jako mala, da bi se postigla dobra kvaliteta površine. Međutim, ako je aksijalni pomak veći od $2R_{ocost}$, povećavajući kut valjanja smanjuje se visina neravnina koja ostaje na obrađenoj površini.

Da bi demonstrirali učinak kuta valjanja na visinu neravnina, razmatrati ćemo sljedeći slučaj obrade, gdje je (C) smjer pozitivan, dubina rezanja je 5mm, a vrijednost aksijalnog pomaka ćemo uzimati različitu, npr. 5mm i 10mm. Rezni alat je kuglasto glodala promjera 12mm. Na *Slici 33(a)* prikazan je učinak kuta valjanja za dva slučaja. Kada je vrijednost aksijalnog pomaka 5mm, kut valjanja ne utječe na visinu neravnina jer uvjet $s < 2R_{ocost}$ vrijedi za taj raspon kuta valjanja. Međutim, kada je vrijednost aksijalnog pomaka povećana na 10mm, uvjet $s > 2R_{ocost}$ je zadovoljen kada apsolutna vrijednost nagiba valjanja prekorači $33,6^\circ$. Na *Slici 33(a)* se vidi da se visina neravnina smanjuje za veće vrijednosti kuta valjanja nagiba glodala.

Učinak kuta valjanja glodala na dopuštene vrijednosti aksijalnog pomaka, za različite visine neravnina, prikazan je na *Slici 33(b)*. Jasno se vidi da povećanje kuta valjanja uzrokuje povećanje dopuštenog aksijalnog pomaka, rezultirajući manjim brojem reznih putanja da bi se postigla ista kvaliteta obrađene površine. [1]



Slika 33 Varijacije za (a) visina neravnina i (b) dopušteni aksijalni pomak za kut poniranja [1]

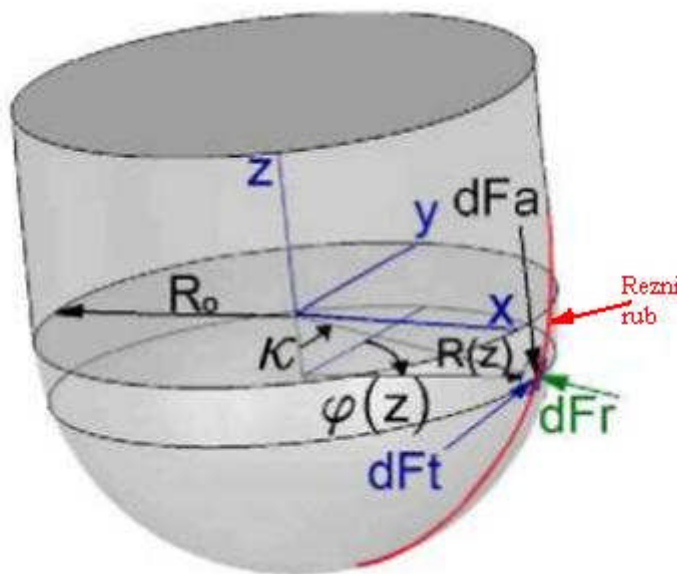
10.3 Rezni moment, sile i oblik pogreške

Efekti kutova valjanja i poniranja na momente, sile i oblik pogreške mogu se samo provjeriti kroz razne simulacije radi kompleksne geometrije kuglastog glodala i ne-linearnih varijacija. Međutim, postoje neke informacije za učinke kutova valjanja i poniranja za sljedeće slučajeve obrade uzimajući u obzir geometriju i mehaniku procesa za grubu obradu i završne operacije, zasebno.

10.4 Operacije grube obrade

Za operacije grube obrade, ograničenja kao što su sile rezanja, momenti, snaga i lomljivost (izdržljivost) alata su uzeti u obzir. F_{xy} je rezultantna poprečna sila koja djeluje na rezni alat u xy – ravnini i ona rezultira savijanje koje može uzrokovati pucanje držača reznog alata. Snaga rezanja je proporcionalna reznom momentu koji se može izračunati integracijom produkta lokalnog radijusa $R(z)$ i lokalne tangencijalne sile (dF_t) na diferencijalni element (Slika 34) preko zone djelovanja. Kod kuglastih glodala, lokalni radijus se povećava uzduž smjera osi alata (z) do cilindričnog dijela. Kutovi valjanja i poniranja utječu na snagu rezanja i moment kako se mijenjaju zone djelovanja lokalni radijus $R(z)$. [1]

Da bi ovo ilustrirali, kombinacija kutova valjanja i poniranja, gdje je zona djelovanja na gornjoj strani vrha glodala uzduž osi alata (z) i druga kombinacija kutova valjanja i poniranja, gdje je zona djelovanja na donjoj strani vrha glodala uzduž osi alata (z) su prikazani na *Slici 29 (a) i (b)*.



Slika 34. Prikaz lokalnih sila rezanja [1]

Kut valjanja se može odabrati kao blago pozitivan da bi se izbjegao kontakt vrha glodala i površine radnog komada, a da se pri tome rezni moment, a samim time i snaga, drži nizak. Ako je (C) smjer negativan, kut poniranja bi se trebao odabrati negativan na taj način da os alata bude usmjerena prema radnom komadu kako je prikazano na *Slici 29*. U ovom slučaju, zona djelovanja je zadržana na donjoj strani reznog alata uzduž osi alata, kao što je prikazano na *Slici 29(b)*. Kao rezultat, lokalni radijus u zoni djelovanja, i rezultirajući rezni moment, kao i snaga su zadržani na minimumu. Međutim, ako je kut poniranja pozitivan, rezni alat je nagnut prema radnom komadu i zona djelovanja se pomjera na gornji dio reznog alata kako je prikazano na *Slici 29(a)* rezultirajući većim lokalnim radijusom u zoni rezanja i većim reznim momentom. Slično, ako je (C) smjer pozitivan, radi spomenutih razloga, kut

poniranja bi trebao biti pozitivan. Ipak, točne vrijednosti kutova valjanja i poniranja mogu biti određene samo ako se vrše simulacije bazirane na procesnim podacima.

Takve informacije mogu biti korisne u odabiru kuta poniranja u operacijama grube obrade gdje su dubine rezanja, aksijalni pomak i posmak već određeni. Na primjer, ako se koriste kuglasta glodala velikih promjera, koja prave velika opterećenja, rezni moment i snaga se mogu povećati do dozvoljenih opterećenja vretena. Pod takvim uvjetima potrebno je održavati niske rezne momente i snagu da bi se osigurali sigurni uvjeti rada. [1]

10.5 Operacije završne obrade

U operacijama završne obrade, jedno od najvažnijih ograničenja je oblik pogreške na površini radnog komada. Ona je definirana kao dimenzionalna pogreška u okomitom smjeru na površinu (N), koja uključuje udubljenja reznog alata i površine radnog komada. U ovom dijelu ćemo razmatrati udubljenja na reznom alatu.

Općenito, rezni alati su puno tvrdi u smjeru os alata (z), nego u (x) i (y) smjerovima (Slika 34). Iz tog razloga, ako je os reznog alata (z) orijentirana u smjeru okomice na površinu (N) radnog komada ($valjanje = 0$ i $poniranje = 0$), uvijanje alata uzduž osi alata je minimalno. Međutim, u ovom slučaju vrh reznog alata je u kontaktu sa površinom radnog komada. Kao rezultat toga, završena površina bi mogla biti slabije kvalitete, pogotovo ako se radi o mekšim materijalima kao što je aluminij.

Važan čimbenik u izboru kuta nagiba je „*overcutting*“. Ako rezni alat počinje rezanje od gotove površine, ovisno o veličini i smjeru sila rezanja, u trenutku stvaranja površine, rezni alat može skrenuti u površinu radnog komada. Ovo je slučaj kada je kut nagiba negativan za rezni alat koji se vrti u smjeru kazaljke na satu. U ovom slučaju treba se izbjegavati negativan kut nagiba za završne operacije obrade. Slično tome, za rezne alate koji se vrte u smjeru suprotnom od kazaljke na satu treba izbjegavati pozitivan kut nagiba reznog glodala.

Iako se kvantitativni učinak kutova valjanja i poniranja na otklon alata, u smjeru okomitom na površinu radnog komada, može samo predvidjeti kroz simulacije koristeći model procesa, može se zaključiti da, za rezne alate koji se vrte u smjeru kazaljke na satu,

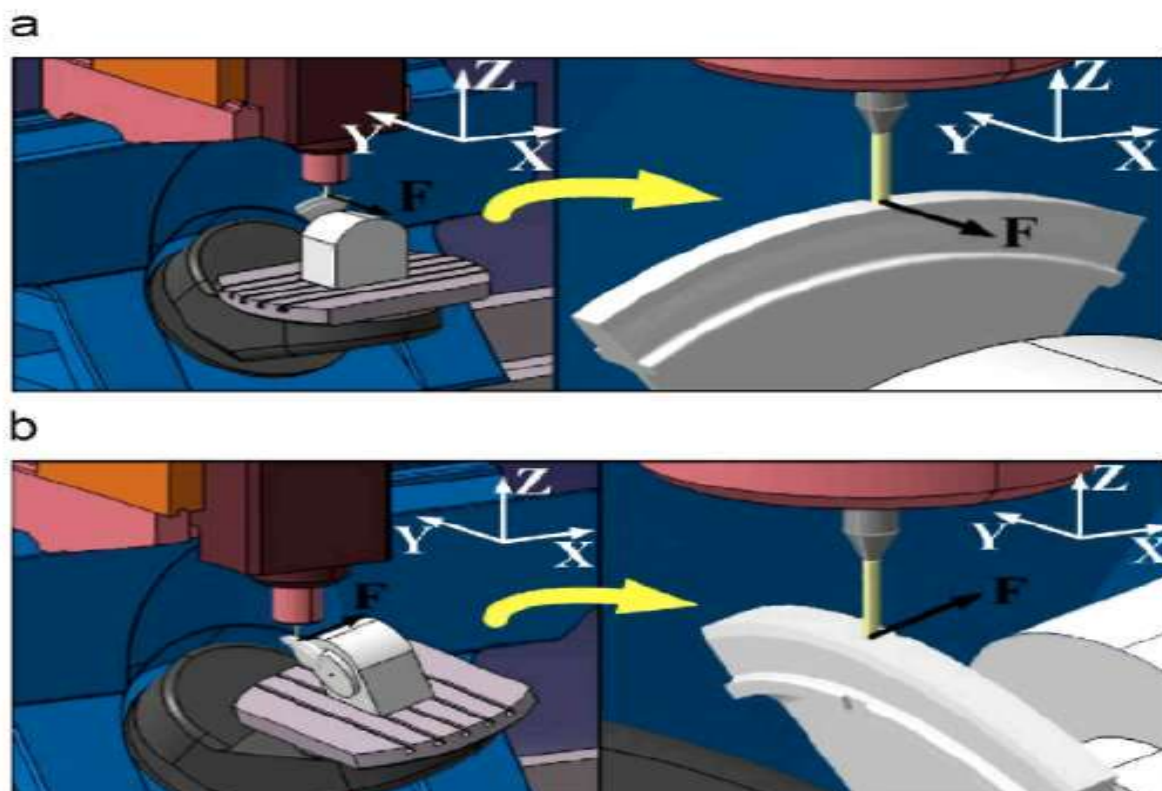
blago pozitivni kutovi nagiba mogu pridonijeti manjem otklonu reznog alata da bi se izbjegao kontakt vrha glodala sa površinom radnog komada. [1]

10.6 Stabilnost

Kutovi valjanja i poniranja imaju učinak na matricu koeficijenata smjera, koja definira odnos između dinamičkog pomaka i dinamičkih sila rezanja, budući da oni mijenjaju zonu djelovanja između reznog alata i površine radnog komada. Granice stabilnosti su određene rješenjem vrijednosti sljedećeg problema:

$$[F]e^{i\omega_c T} = \Delta a(1 - e^{-\omega_c T}) \left(\sum_{i=1}^m B_0^i \right) [G(i\omega_c)] [F]e^{i\omega_c T} \quad (37)$$

Ovisno o kinematičkoj konfiguraciji alatnih strojeva, kutovi nagiba mogu također imati učinak na prijenosnu funkciju G (37). Ovaj učinak je vidljiv kada su rotacijske osi stroja na radnom stolu (*Slika 35*) i mjerene prijenosne funkcije reznog alata u dva ortogonalna smjera, npr smjer (X) i smjer (Y), nisu isti. U ovom slučaju smjer posmaka (F) zavisi od kutova nagiba.



Slika 35. Učinak kutova valjanja i poniranja na smjer posmaka: (a) 3-osno glodanje i (b) 5-osno glodanje [1]

Za primjer 3-osnog glodanja kuglastim glodalom, smjer posmaka sa obzirom na radni komad je prikazan na *Slici 35 (a)*. On se poklapa sa $-Y$ smjerom koordinatnog sustava stroja, koji je referentni koordinatni sustav. Međutim, kad se kutovi nagiba primjene u procesu, da bi zadovoljili isti smjer posmaka u odnosu na radni komad, smjer posmaka u odnosu na koordinatni sustav stroja se mora promijeniti kako je prikazano na *Slici 35(b)*. Ovo se osobito uzima u obzir kod konfiguracije alatnih strojeva gdje su rotacijske osi na strani radnog stola. Kako bi se ova izmjena uzela u obzir kod formulacije stabilnosti, izmjerene matrice prijenosnih funkcija moraju biti orijentirane prema tome. Izmjerena matrica prijenosne funkcije H može biti orijentirana pomoću prijenosne matrice T_G na sljedeći način:

$$G = T_G^T H T_G \quad (38)$$

Kao rezultat toga, s obzirom na njihov učinak na koeficijent smjera i orijentiranu matricu prijenosne funkcije, kutovi valjanja i poniranja mogu znatno promijeniti granice stabilnosti procesa. [1]

11 EKSPERIMENT

Cilj eksperimenta je da se pokuša pokazati utjecaj nagiba osi prstastog glodala sa oblim vrhom na visinu neravnina na obrađenim uzorcima, kao i utjecaj kontakta vrha glodala, u kojem je brzina rezanja jednaka nuli, sa površinom radnog komada. Eksperiment je odvijan na taj način da su se konstantnim držale sve bitne vrijednosti osim nagiba glodala u odnosu na obrađivanu površinu.

11.1 Uvjeti obrade

➤ *Stroj*

Obrada uzoraka je urađena na stroju DECKEL MAHO DMU 80 monoBLOCK.



Slika 36. DMU 80 monoBLOCK

➤ Glodalo

Za obradu je korišteno tvrdo-metalno prstasto glodalo sa oblim vrhom (BALL NOSE) promjera 8mm sa dvije rezne oštrice.



Slika 37. Tvrdo-metalno prstasto glodalo sa oblim vrhom promjera 8mm

➤ *Materijali*

Ispitivanje je urađeno na dvije vrste materijala, aluminij i čelik.

- *Kemijski sastav aluminija (AlSi11Mg)*

Tablica 2. Kemijski sastav aluminija AlSi11Mg

Kemijski sastav	
<i>chemical composition %</i>	
Al	88,80
Si	10,78
Fe	0,103
Cu	0,00180
Mn	0,00210
Mg	0,162
Cr	0,00060
Ni	0,00460
Zn	0,01070
Ti	0,0932
B	0,00180
Be	0,00000
Ca	0,00170
Na	0,00030
P	0,00040
Pb	0,00030
Sb	0,00000
Sn	0,00000
Sr	0,0394

Tvrdoća po Brinellu : 52 HB

- Čelik (Č 1.2343)

Tablica 3. Kemijski sastav čelika Č1.2343

Kemijski sastav	
<i>chemical composition %</i>	
C	0,390
Si	1,05
Mn	0,36
P	0,015
S	0,007
Cr	5,21
Mo	1,16
V	0,37

Tvrdoća po Brinellu : 190 HB

➤ **Parametri obrade**

- **Čelik**

$V_c = 150 \text{ m/min}$; brzina rezanja

$f_z = 0,04 \text{ mm/z}$; posmak po zubu

$n = 5968 \text{ /min}$; broj okretaja

$F = 477 \text{ mm/min}$; posmak glodala

- **Aluminij**

$V_c = 330 \text{ m/min}$; brzina rezanja

$f_z = 0,08 \text{ mm/z}$; posmak po zubu

$n = 13130 \text{ /min}$; broj okretaja

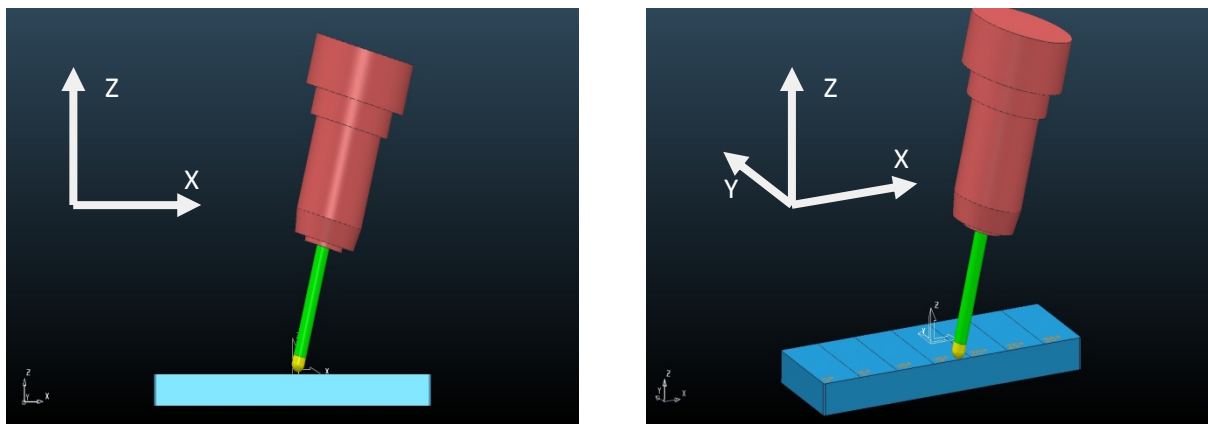
$F = 2100 \text{ mm/min}$; posmak glodala

11.2 Opis obrade uzoraka i rezultati mjerenja

Sva mjerenja uzoraka urađena su u *LABARATORIJU ZA PRECIZNA MJERENJA DUŽINA na FAKULTETU STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB*.

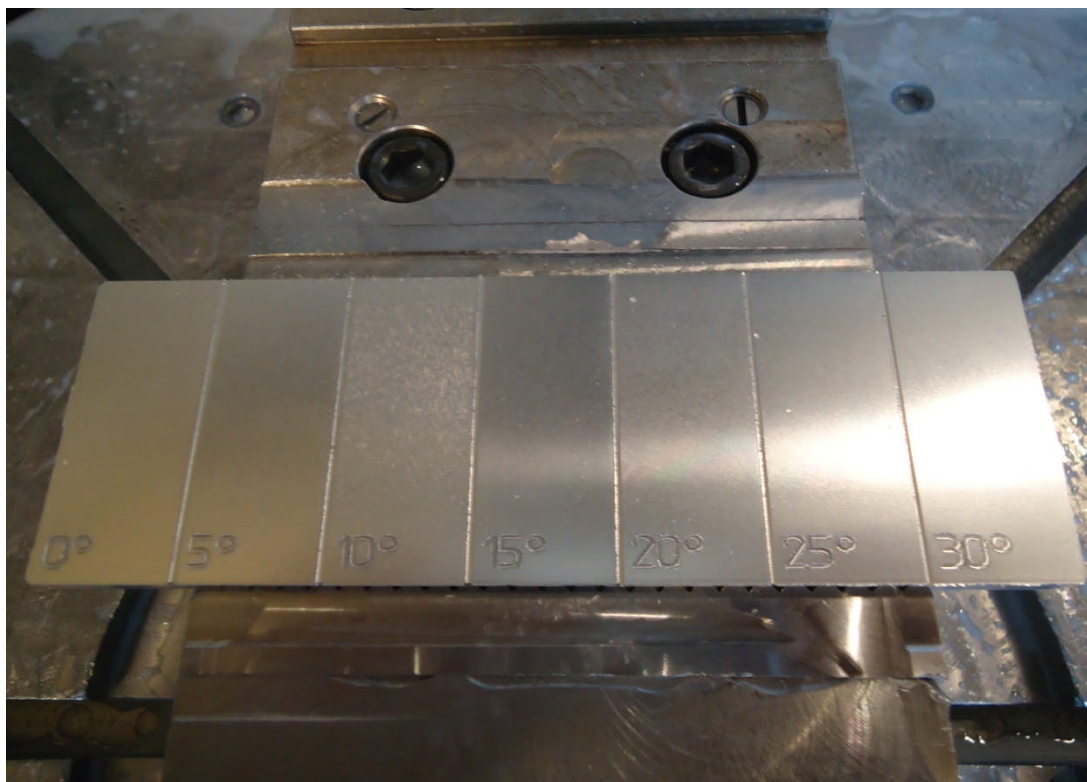
11.3 Obrada uzoraka u rasponu kutova poniranja od 0° do 30°

➤ Opis obrade



Slika 38. Obrada uzoraka u rasponu kuteva poniranja od 0° do 30°

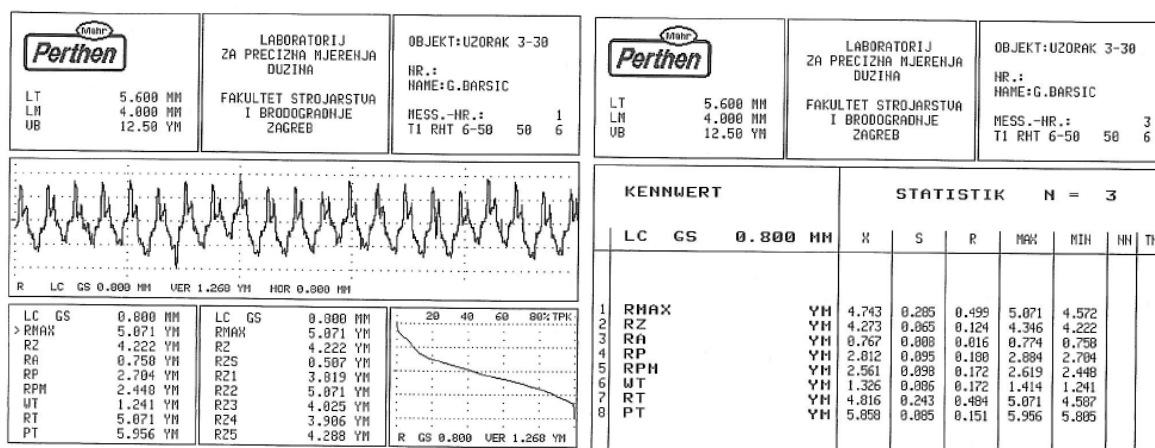
- Nagib glodala *oko osi Y*
- Smjer obrade u *pozitivnom smjeru osi Y*
- Na *Slici 38* prikazana je obrada sa nagibom kuta 15°
- Aksijalni pomak glodala je u *pozitivnom smjeru osi X*
- Radijalna dubina rezanja $a_p=0,2mm$
- Aksijalna dubina rezanja $a_e=0,2mm$



Slika 39. Obradeni uzorak u rasponu kutova poniranja 0° do 30°

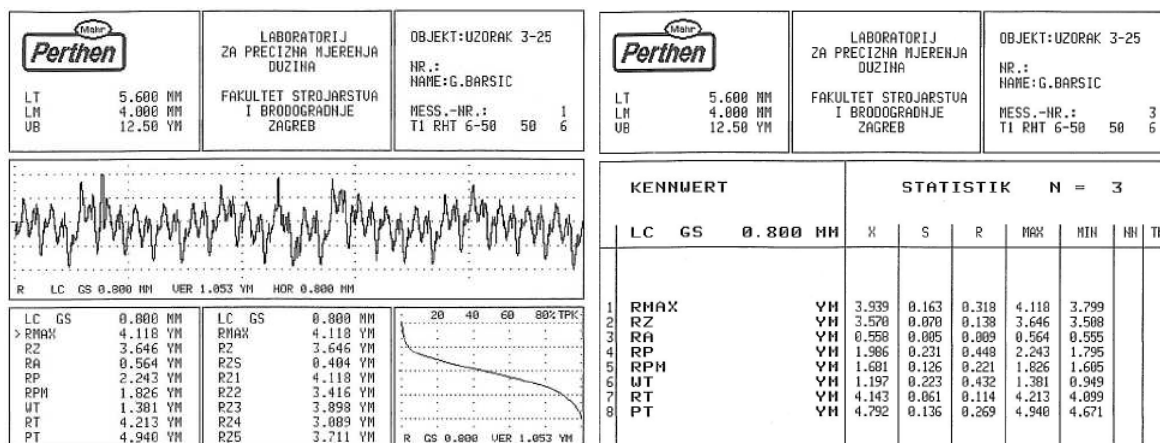
➤ Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak

- Nagib glodala 30°



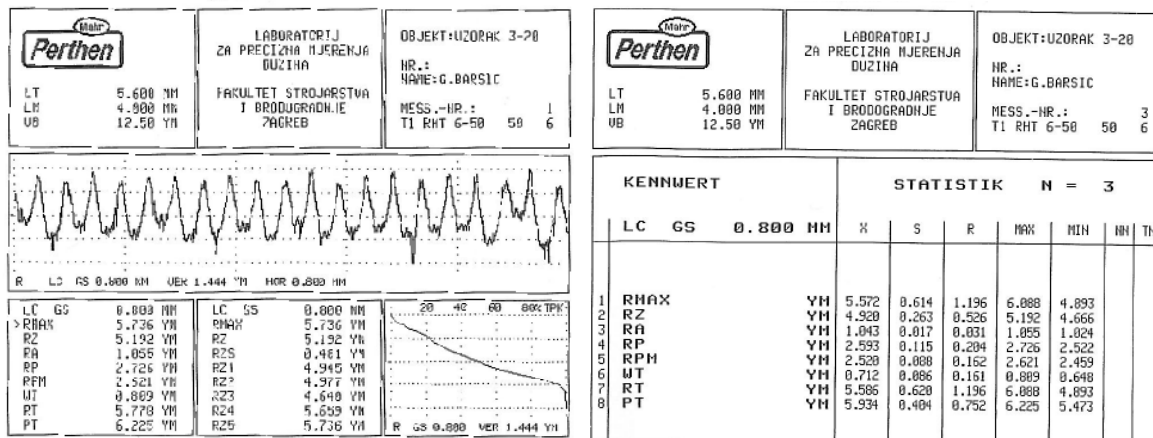
Slika 40. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 30°

- Nagib glodala 25°



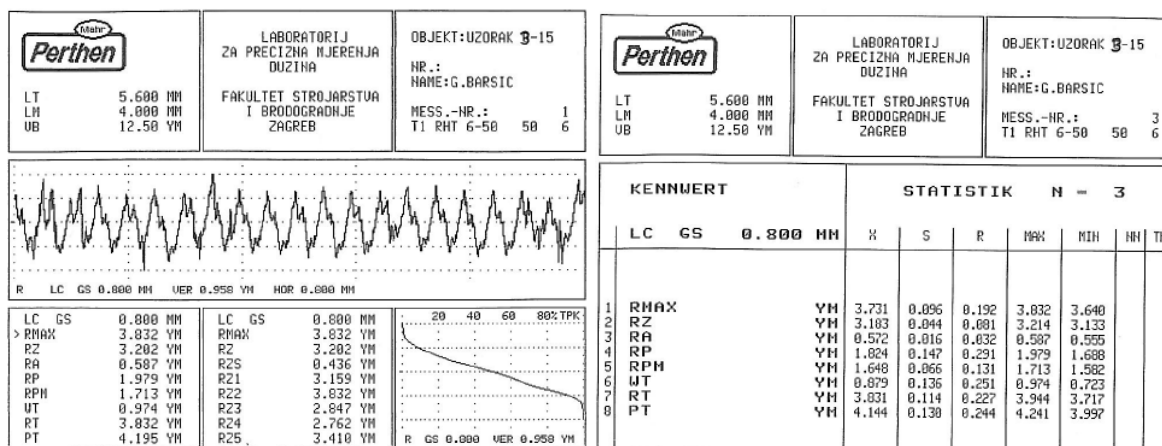
Slika 41. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 25°

- Nagib glodala 20°



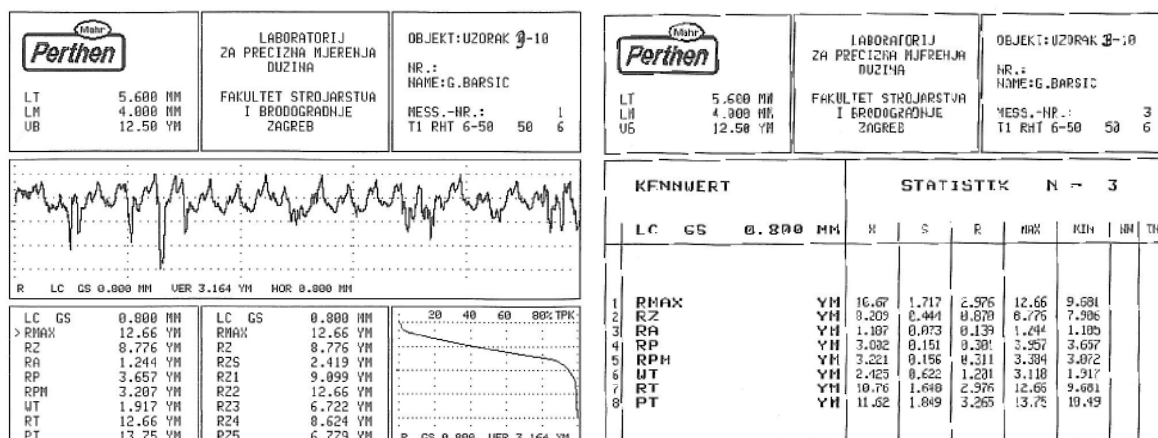
Slika 42. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 20°

- Nagib glodala 15°



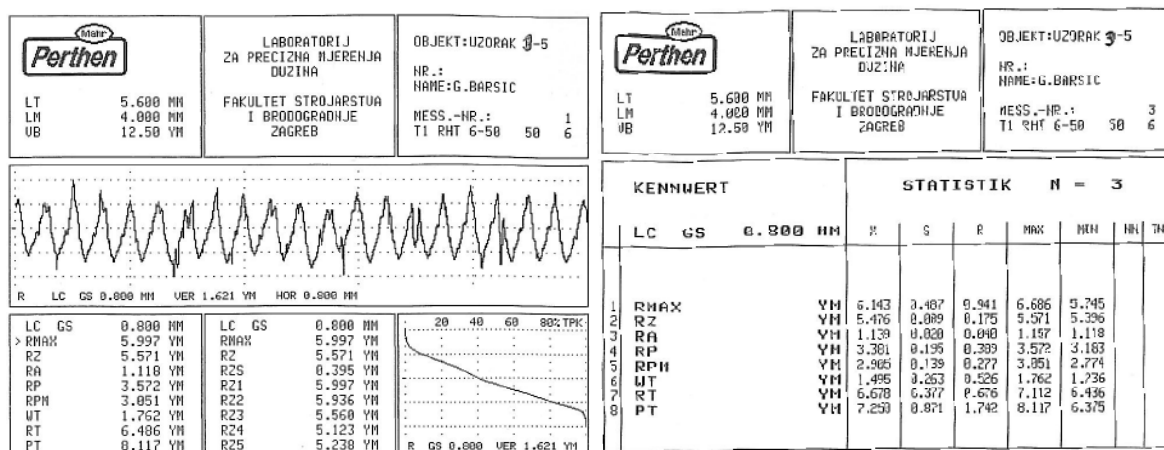
Slika 43. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 15°

- Nagib glodala 10°



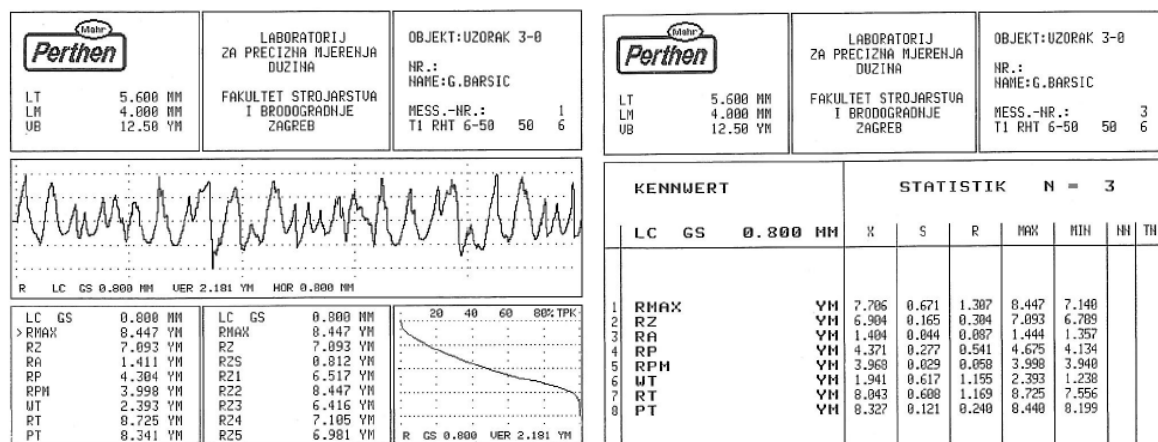
Slika 44. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 10°

- Nagib glodala 5°



Slika 45. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 5°

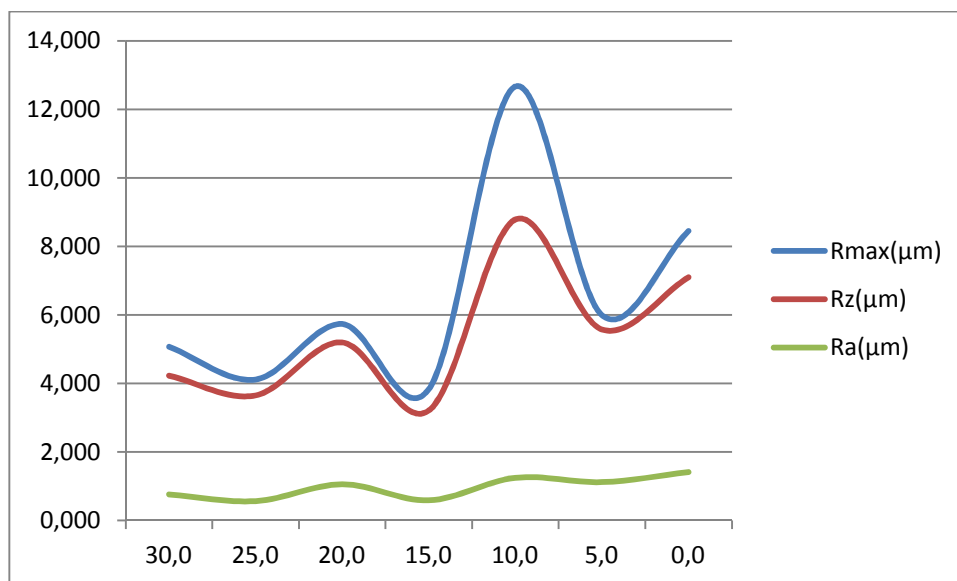
- Nagib glodala 0°



Slika 46. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta 0°

- *Prikaz rezultata*

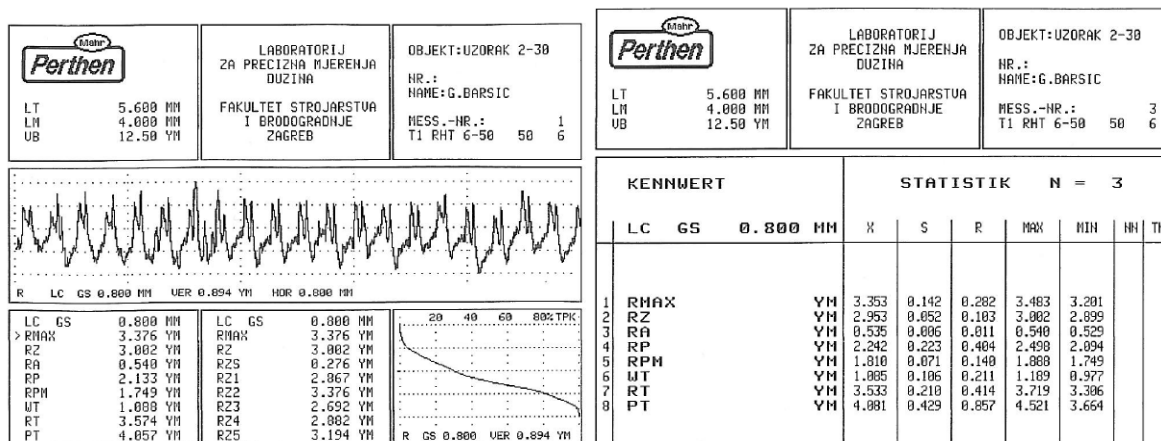
	30,0°	25,0°	20,0°	15,0°	10,0°	5,0°	0,0°
Rmax (μm)	5,071	4,118	5,736	3,832	12,660	5,997	8,447
Rz (μm)	4,222	3,646	5,192	3,202	8,776	5,571	7,093
Ra (μm)	0,758	0,564	1,055	0,587	1,244	1,118	1,411



Slika 47. Prikaz rezultata za aluminijski uzorak u rasponu kutova poniranja od 0° do 30°

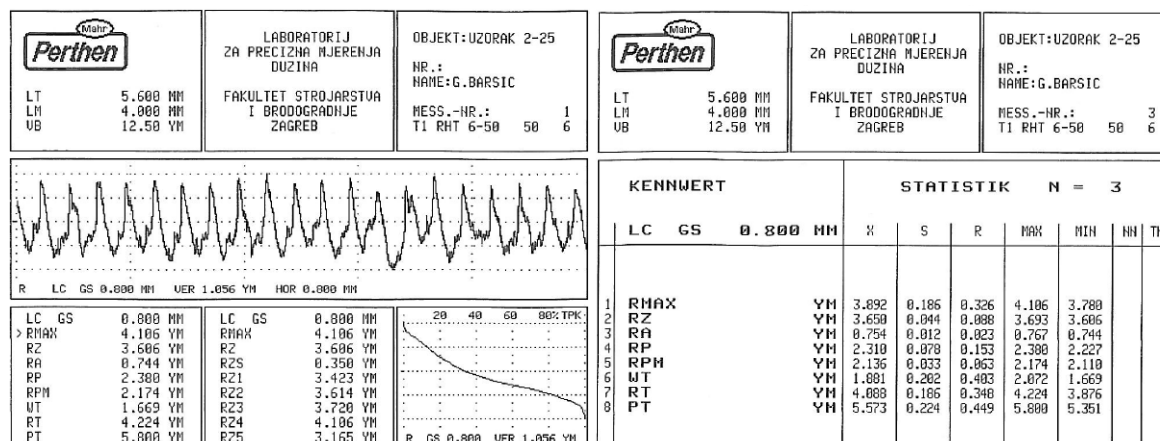
➤ *Rezultati mjerenja za čelični uzorak*

- *Nagib glodala 30°*



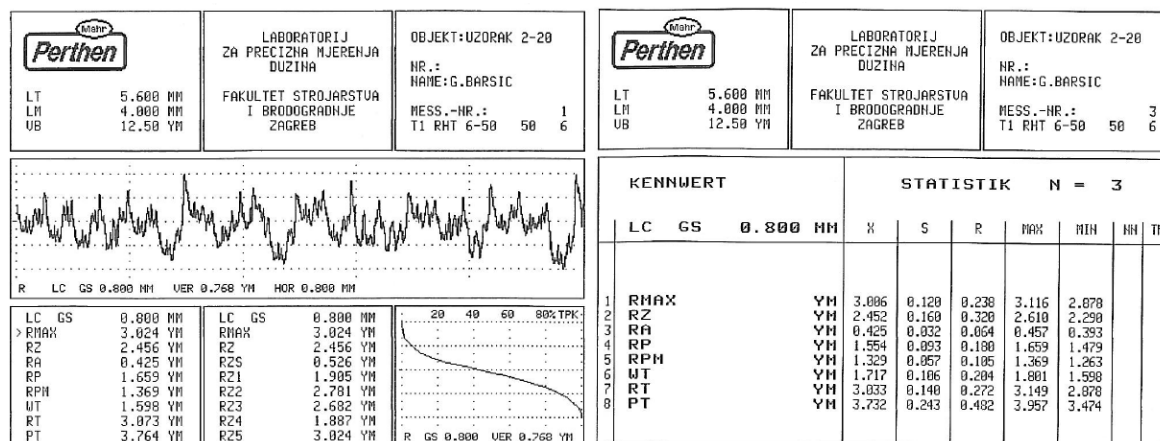
Slika 48. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 30°

- Nagib glodala 25°



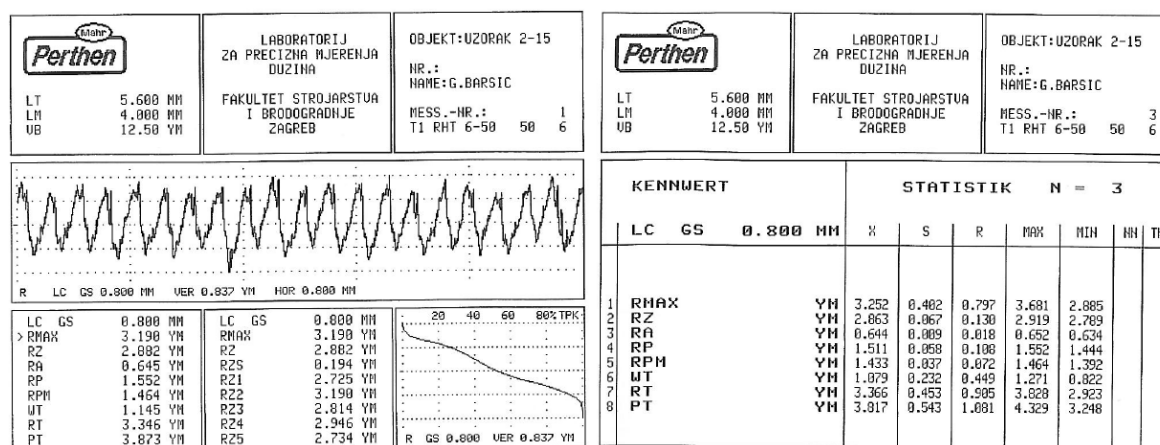
Slika 49. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 25°

- Nagib glodala 20°



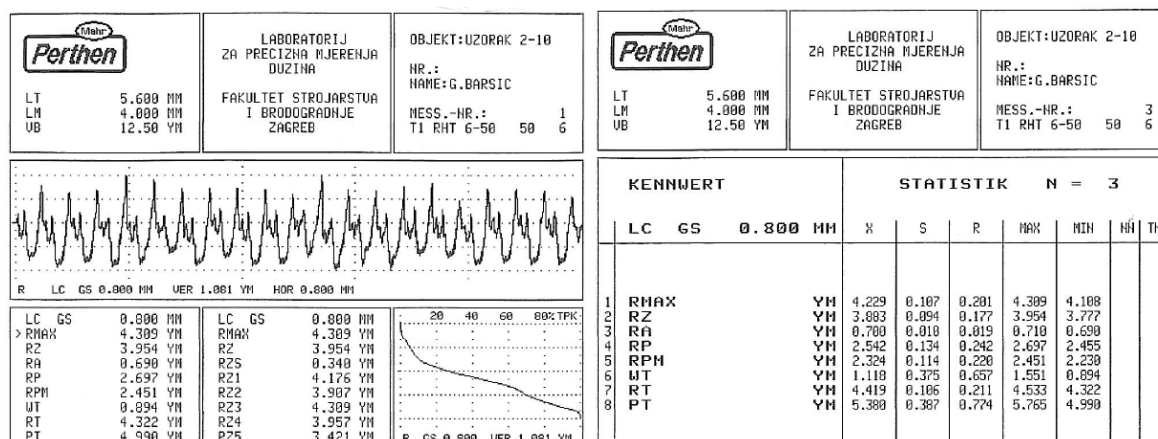
Slika 50. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 20°

- Nagib glodala 15°

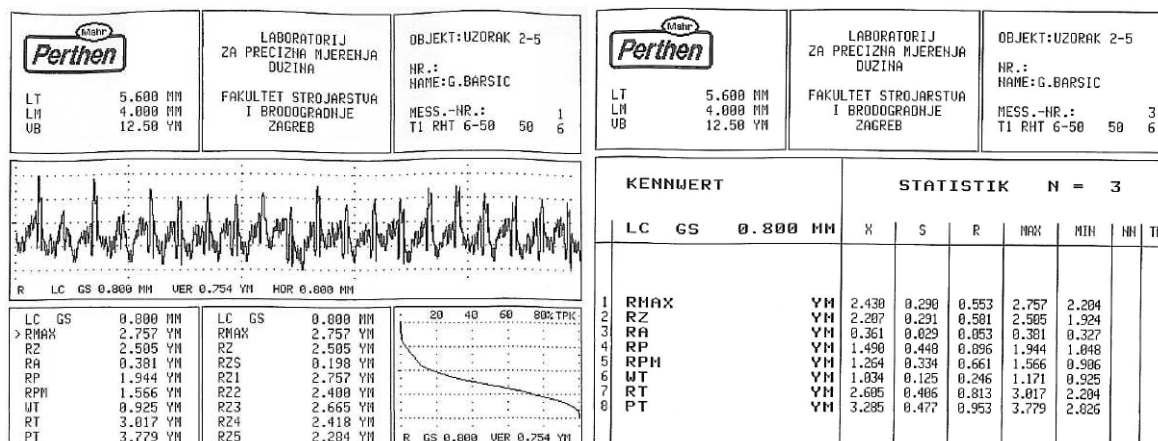


Slika 51. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 15°

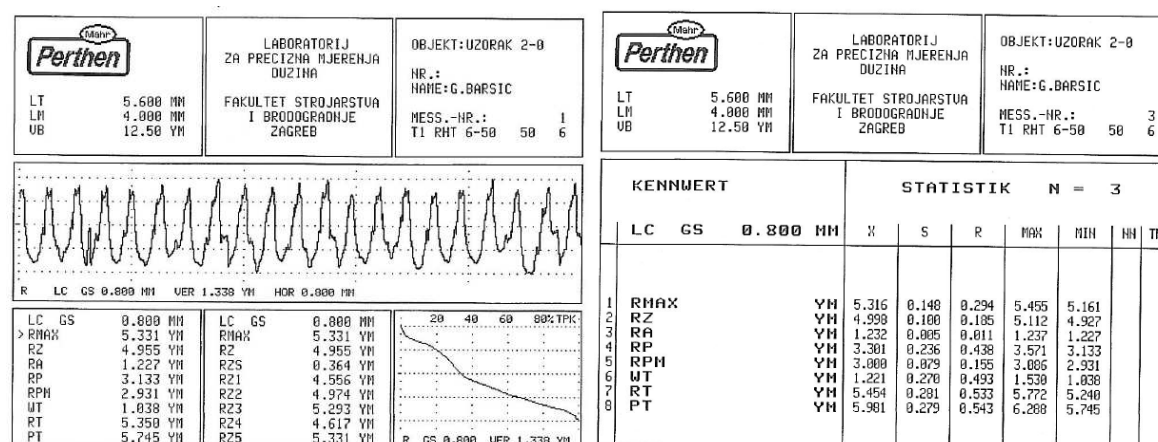
- Nagib glodala 10°

Slika 52. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 10°

- Nagib glodala 5°

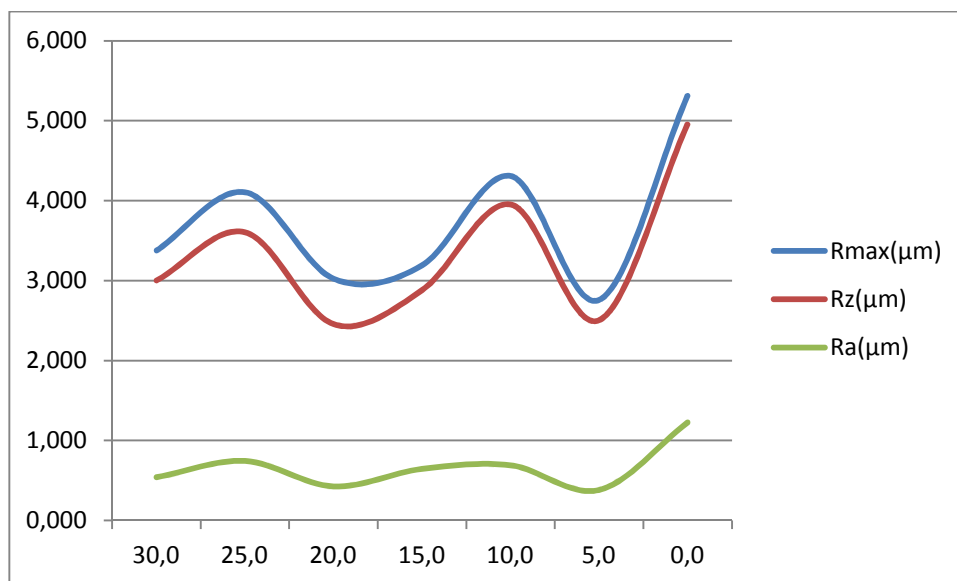
Slika 53. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 5°

- Nagib glodala 0°

Slika 54. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta 0°

- *Prikaz rezultata*

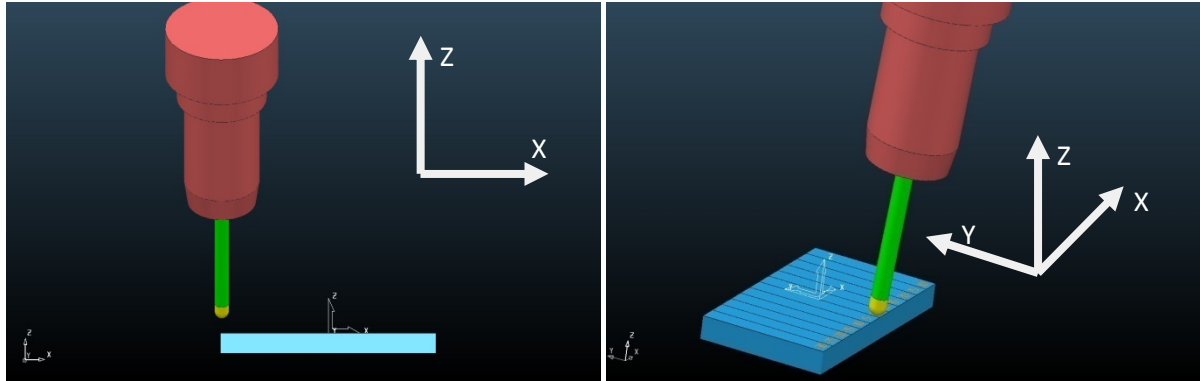
	30,0°	25,0°	20,0°	15,0°	10,0°	5,0°	0,0°
Rmax (μm)	3,376	4,106	3,024	3,190	4,309	2,757	5,311
Rz (μm)	3,002	3,606	2,456	2,882	3,954	2,505	4,955
Ra (μm)	0,540	0,744	0,425	0,645	0,690	0,381	1,227



Slika 55. Prikaz rezultata za čelični uzorak u rasponu kutova poniranja od 0° - 30°

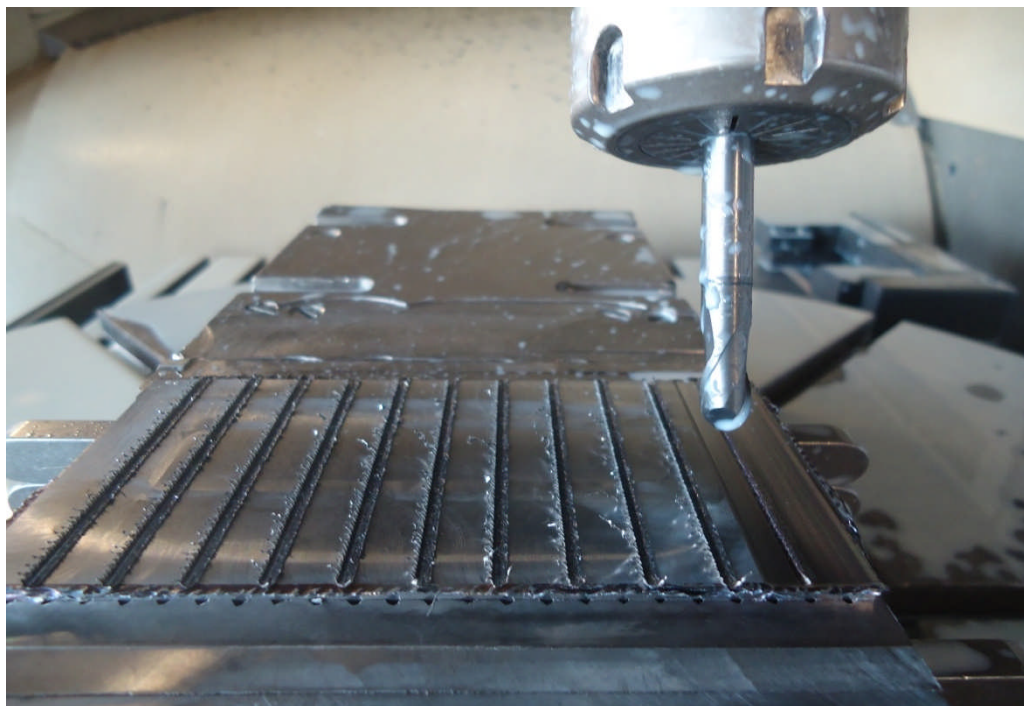
11.4 Obrada uzoraka u rasponu kutova valjanja od -30° do $+30^\circ$

➤ Opis obrade



Slika 56. Obrada uzoraka u rasponu kutova valjanja od -30° do $+30^\circ$

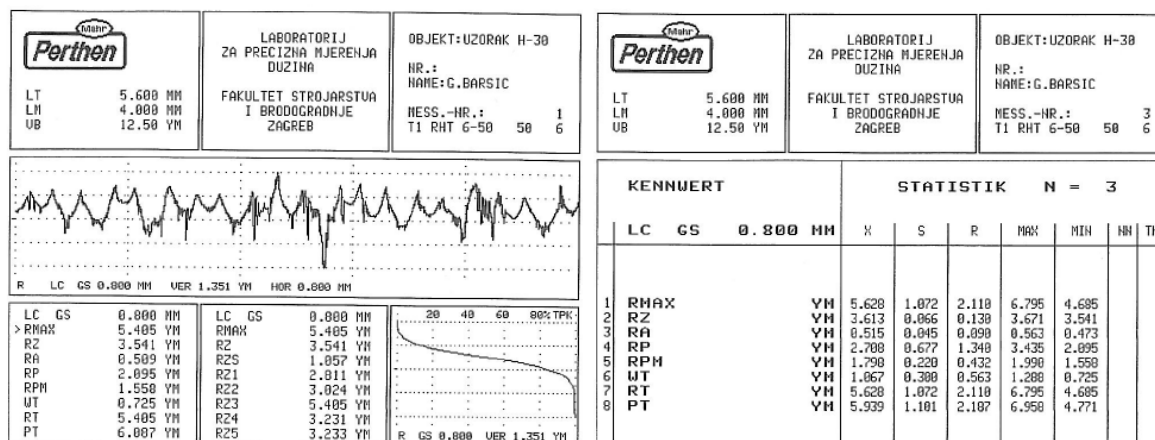
- Nagib glodala oko **osi X**
- Smjer obrade u **pozitivnom smjeru osi Y**
- Aksijalni pomak glodala je u **pozitivnom smjeru osi X**
- Radijalna dubina rezanja (*stepdown*) $a_p=0,2\text{mm}$
- Aksijalna dubina rezanja (*stepover*) $a_e=0,2\text{mm}$



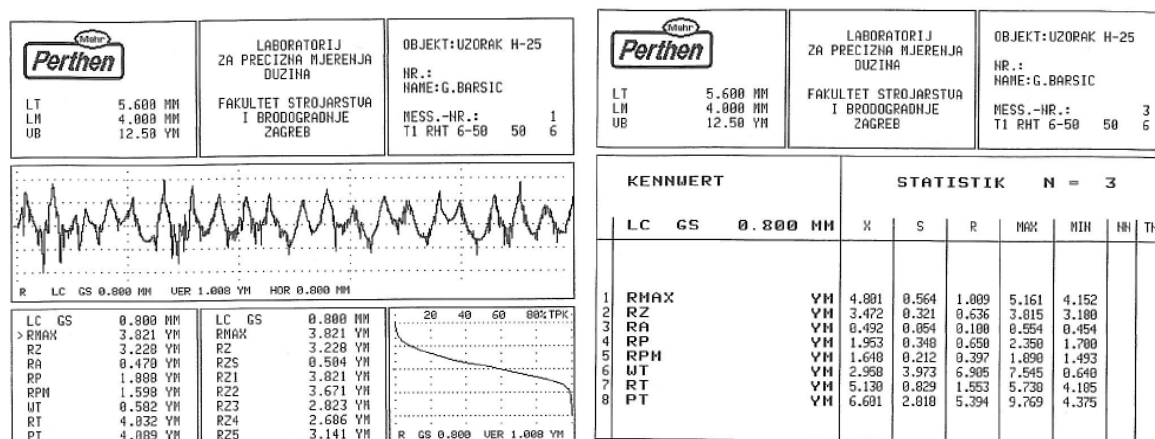
Slika 57. Obrada uzorka u rasponu kutova valjanja od -30° do $+30^\circ$

➤ Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak

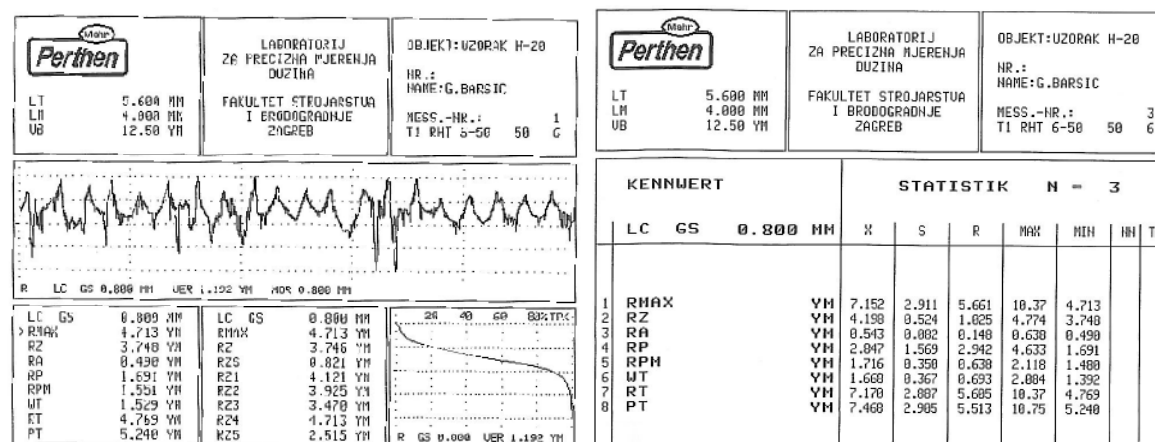
- Nagib glodala -30°

Slika 58. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -30°

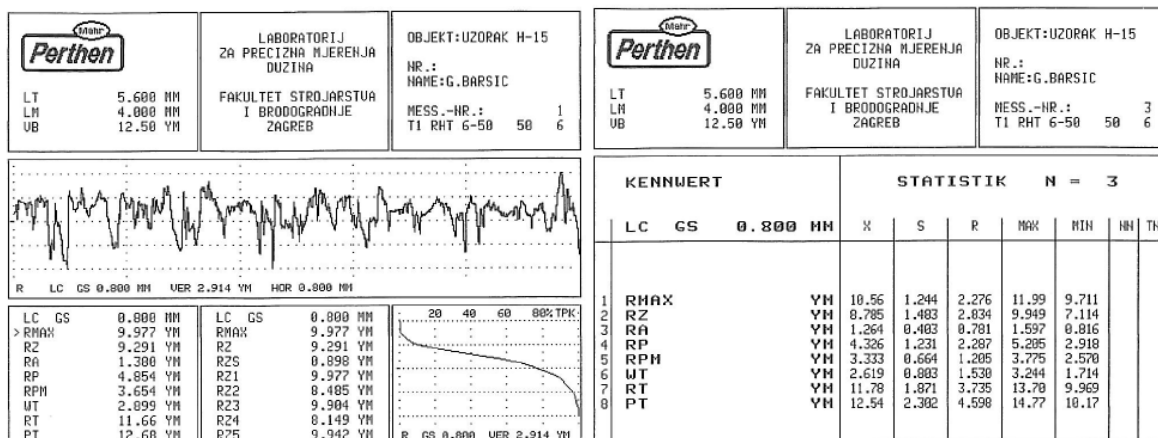
- Nagib glodala -25°

Slika 59. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -25°

- Nagib glodala -20°

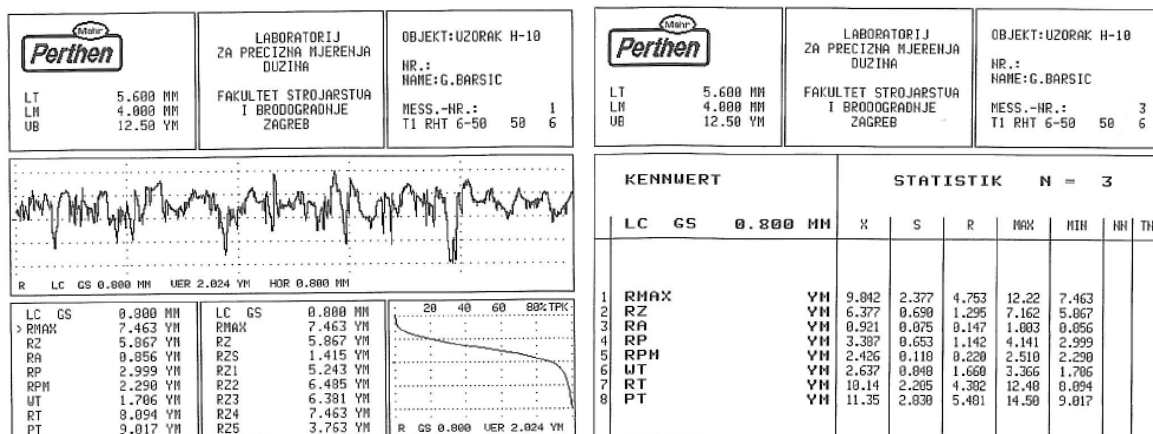
Slika 60. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -20°

- Nagib glodala -15°



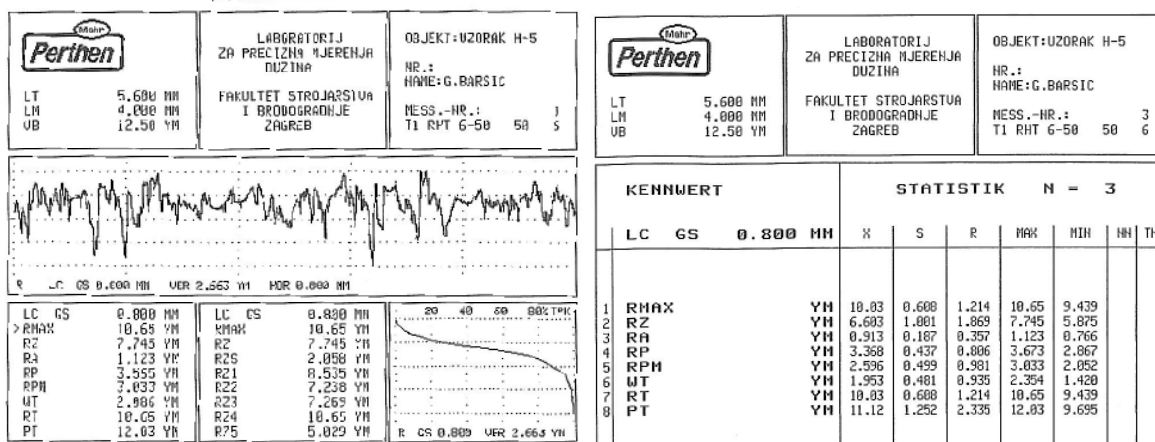
Slika 61. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -15°

- Nagib glodala -10°



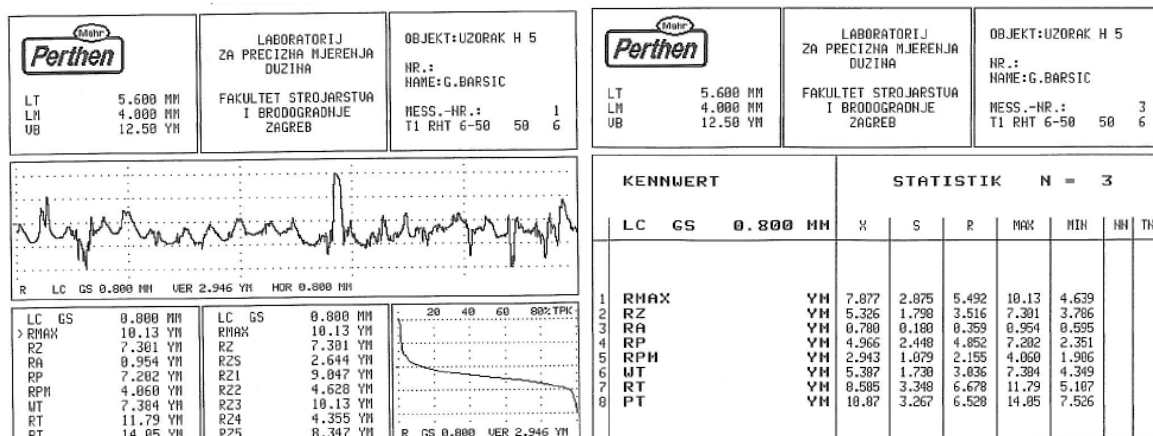
Slika 62. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -10°

- Nagib glodala -5°



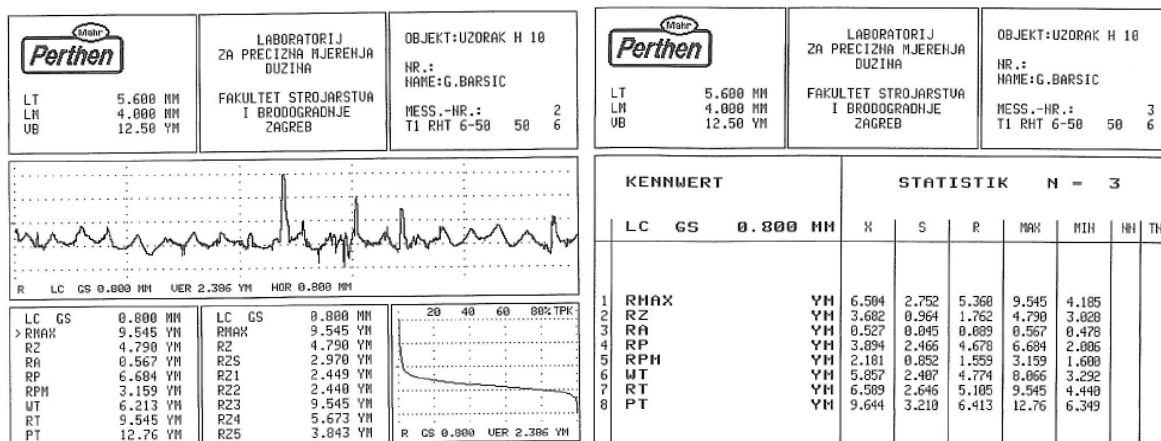
Slika 63. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta -5°

- Nagib glodala $+5^\circ$



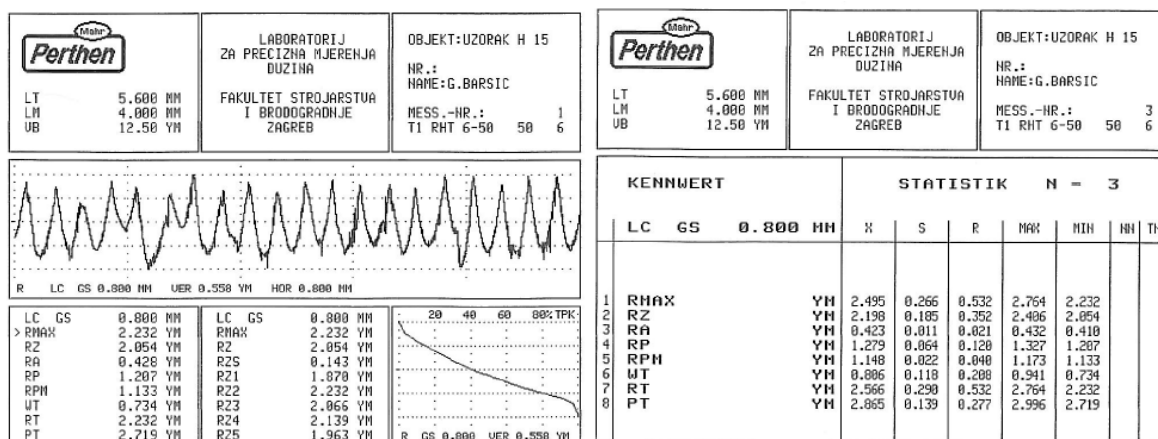
Slika 64. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+5^\circ$

- Nagib glodala $+10^\circ$



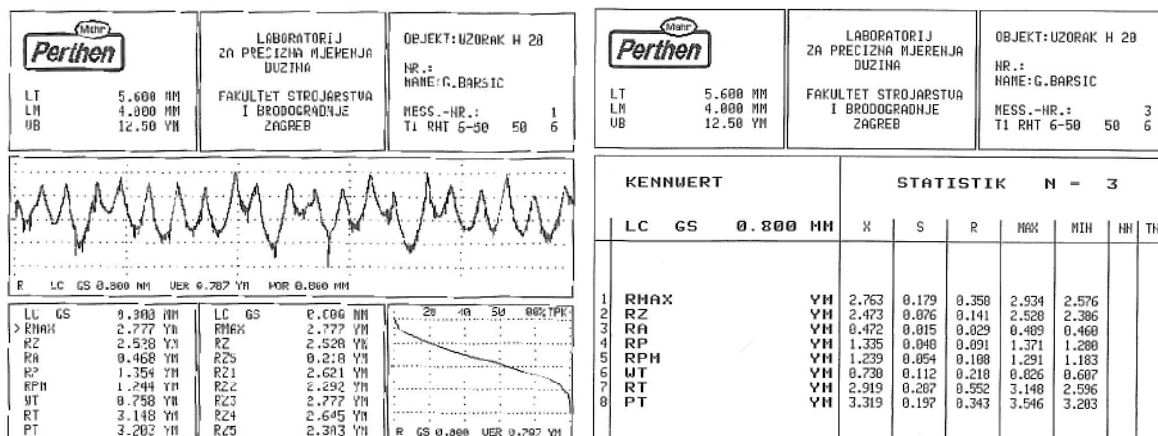
Slika 65. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+10^\circ$

- Nagib glodala $+15^\circ$



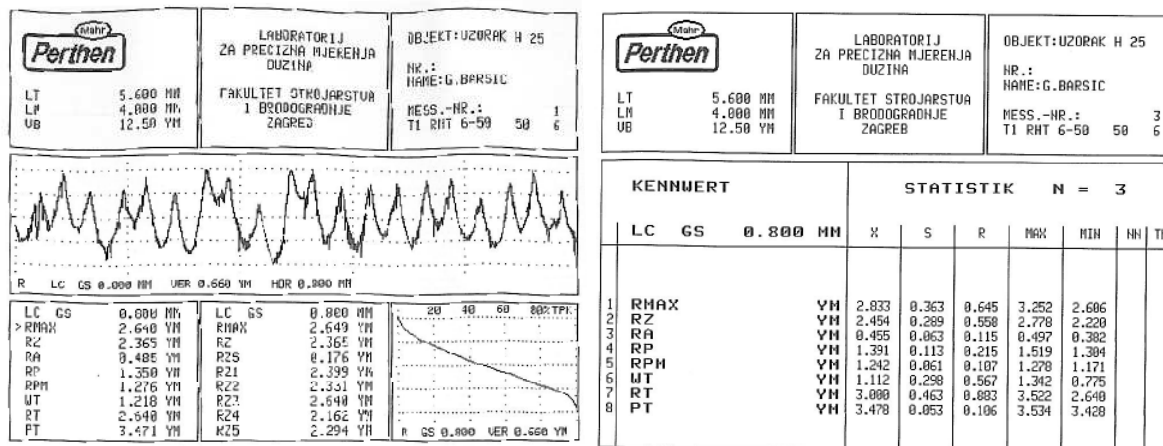
Slika 66. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+15^\circ$

- Nagib glodala $+20^\circ$



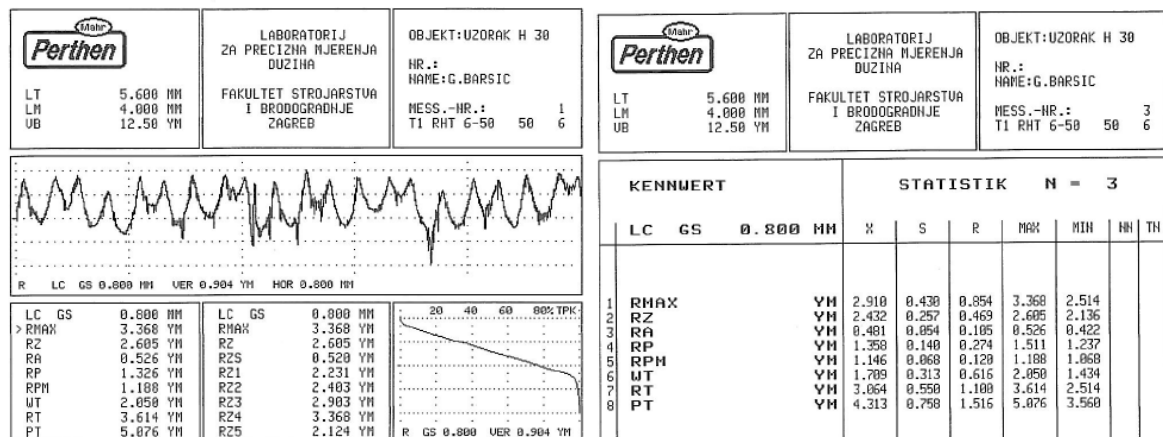
Slika 67. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+20^\circ$

- Nagib glodala $+25^\circ$



Slika 68. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+25^\circ$

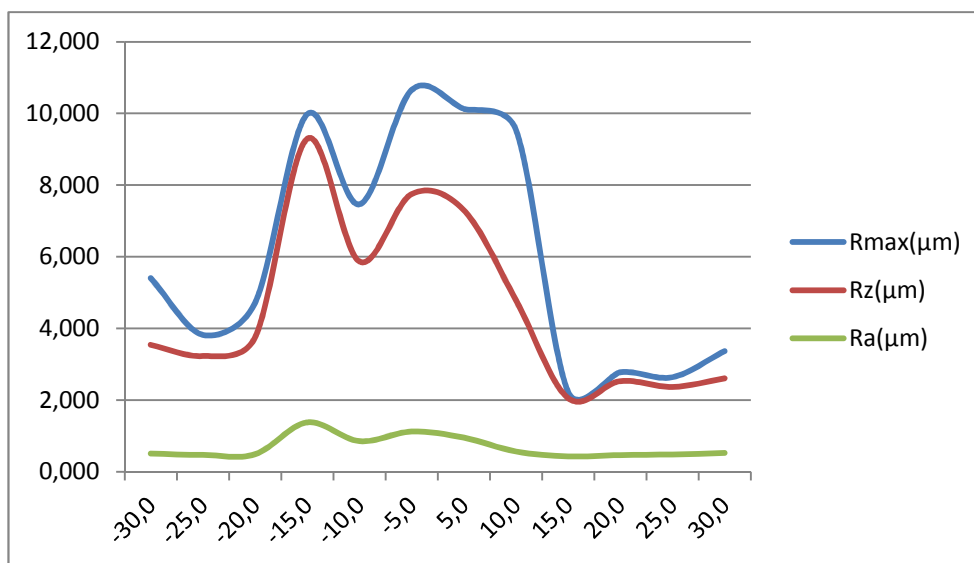
- Nagib glodala $+30^\circ$



Slika 69. Rezultati mjerenja za aluminijski uzorak za nagib kuta $+30^\circ$

- Prikaz rezultata

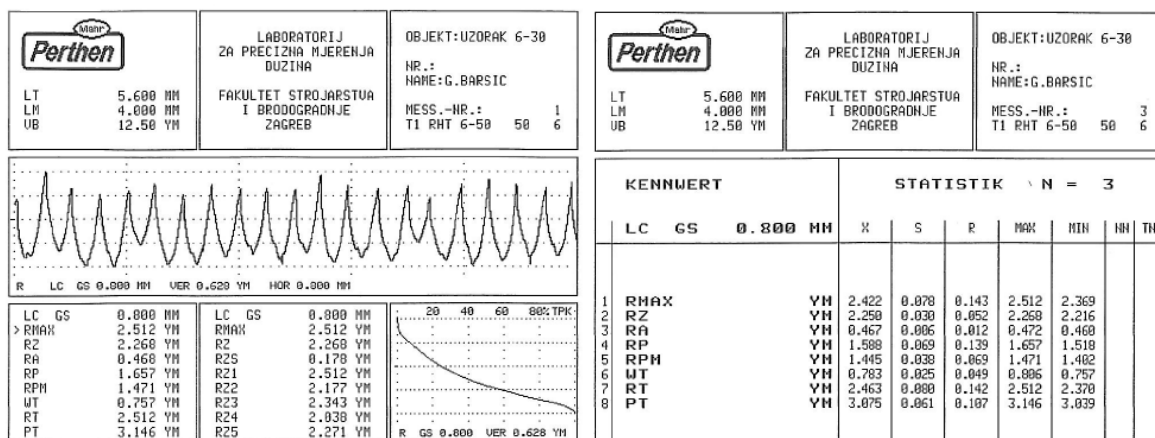
	-30°	-25°	-20°	-15°	-10°	-5°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
Rmax(μm)	5,405	3,821	4,713	9,977	7,463	10,65	10,13	9,545	2,232	2,777	2,640	3,368
Rz(μm)	3,541	3,228	3,748	9,291	5,867	7,745	7,301	4,790	2,054	2,528	2,365	2,605
Ra(μm)	0,509	0,470	0,490	1,380	0,856	1,123	0,954	0,567	0,428	0,468	0,485	0,526



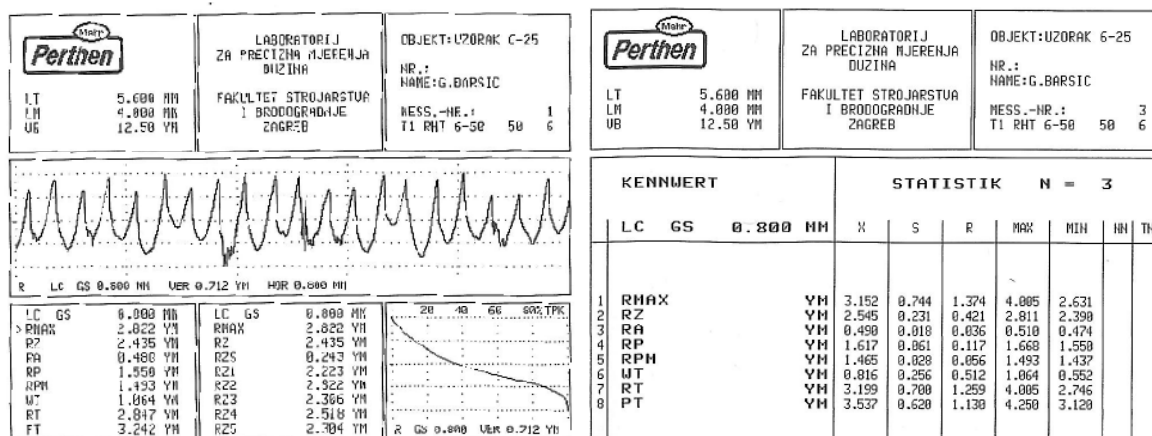
Slika 70. Prikaz rezultata za aluminijski uzorak u rasponu kutova valjanja od -30° do +30°

➤ Rezultati mjerenja za čelični uzorak

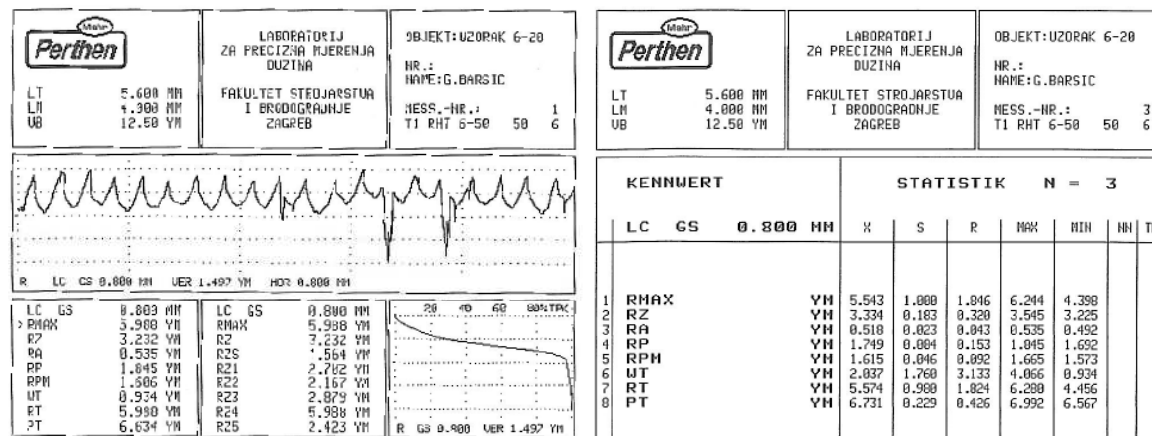
- Nagib glodala -30°

Slika 71. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -30°

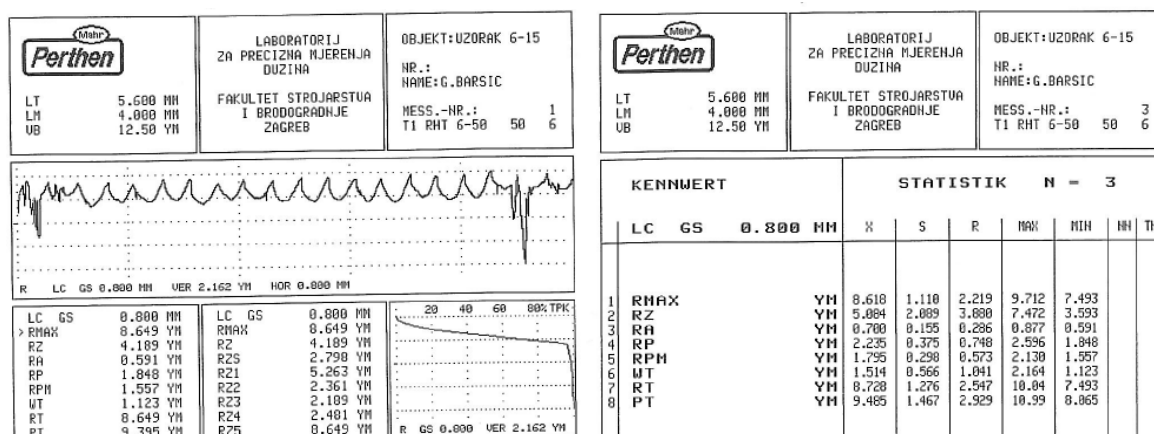
- Nagib glodala -25°

Slika 72. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -25°

- Nagib glodala -20°

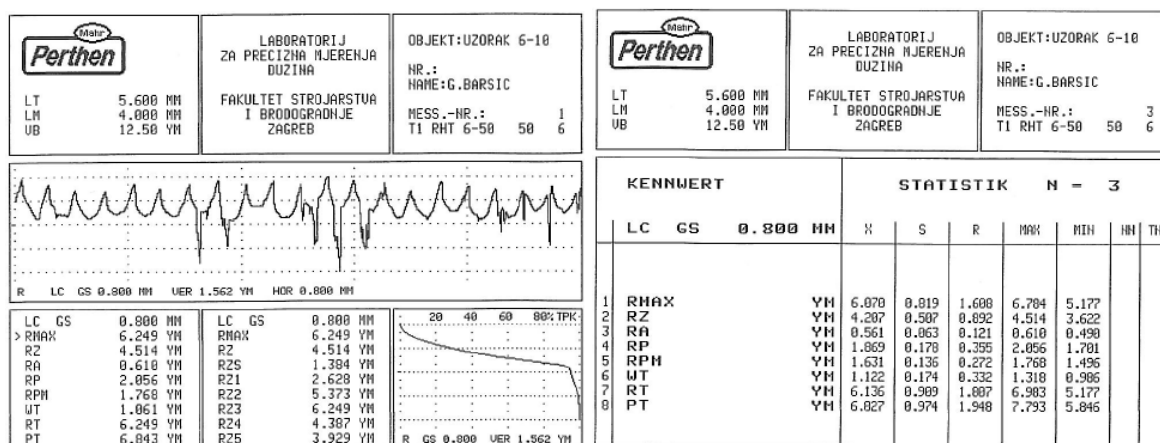
Slika 73. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -20°

- Nagib glodala -15°



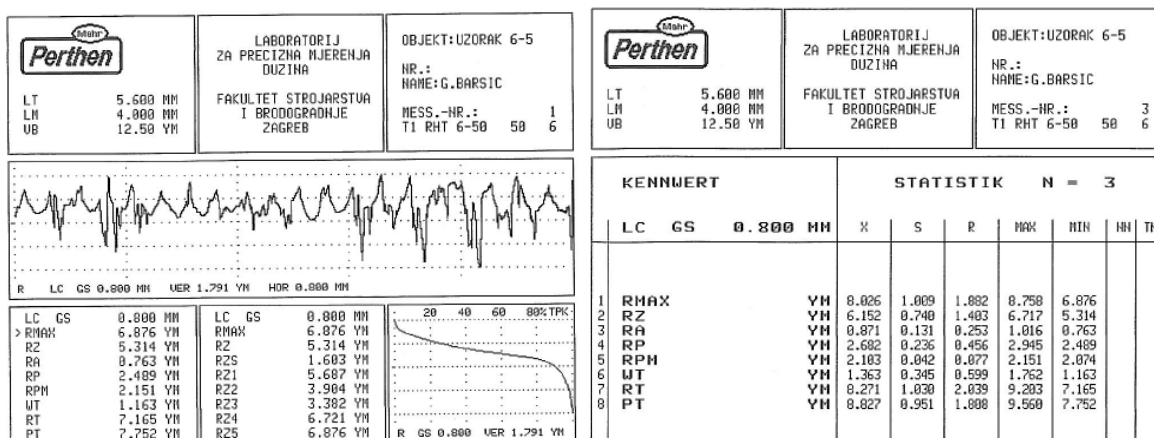
Slika 74. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -15°

- Nagib glodala -10°



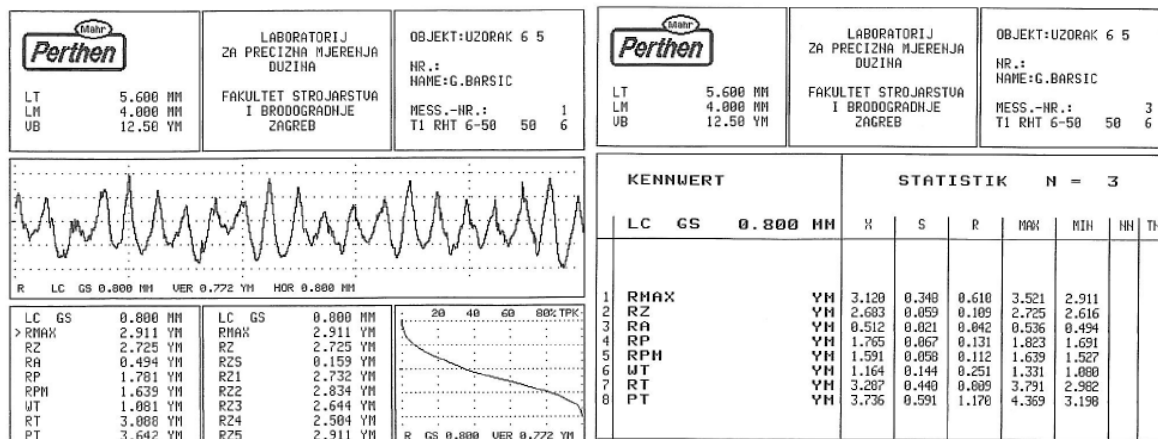
Slika 75. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -10°

- Nagib glodala -5°



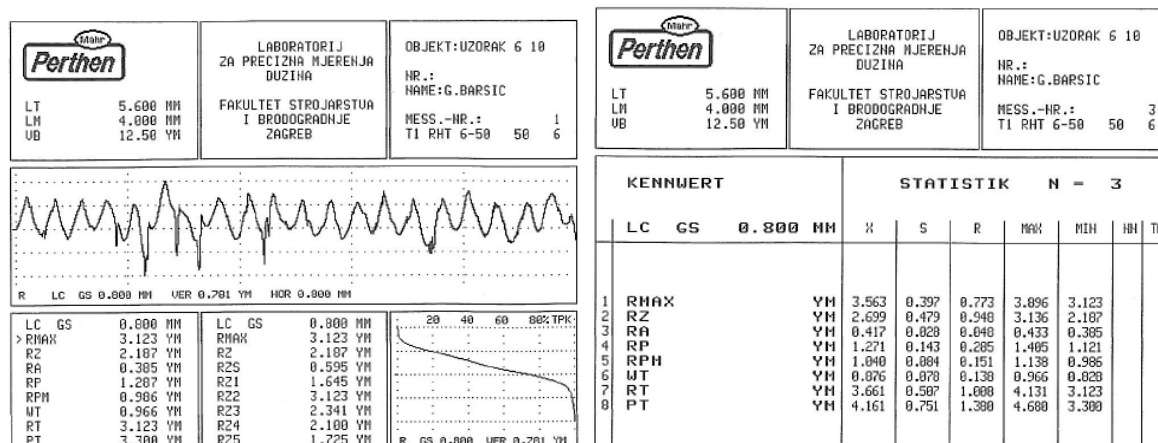
Slika 76. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta -5°

- Nagib glodala $+5^\circ$



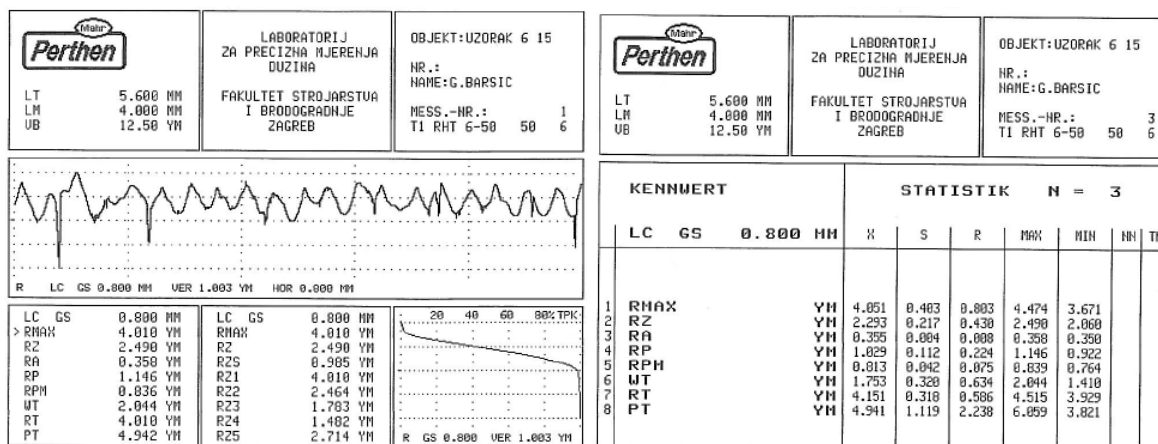
Slika 77. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+5^\circ$

- Nagib glodala $+10^\circ$



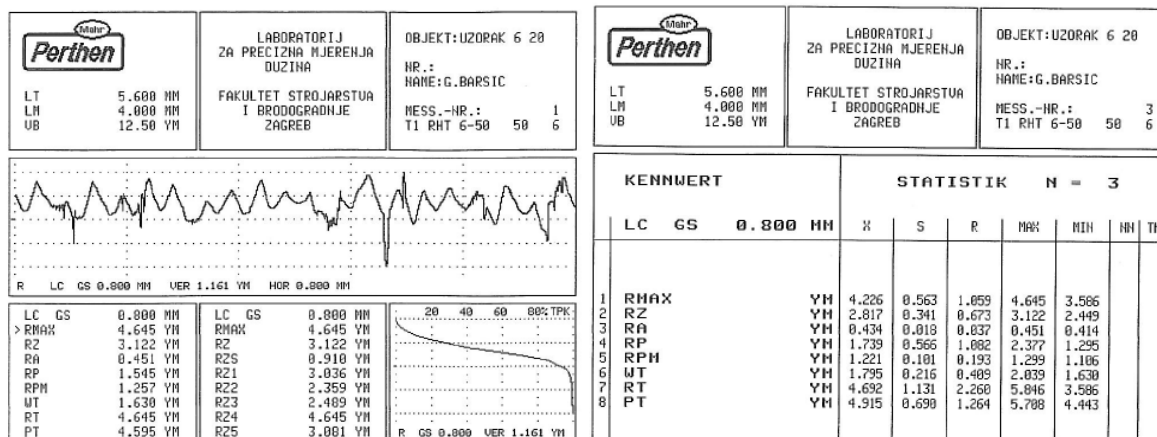
Slika 78. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+10^\circ$

- Nagib glodala $+15^\circ$



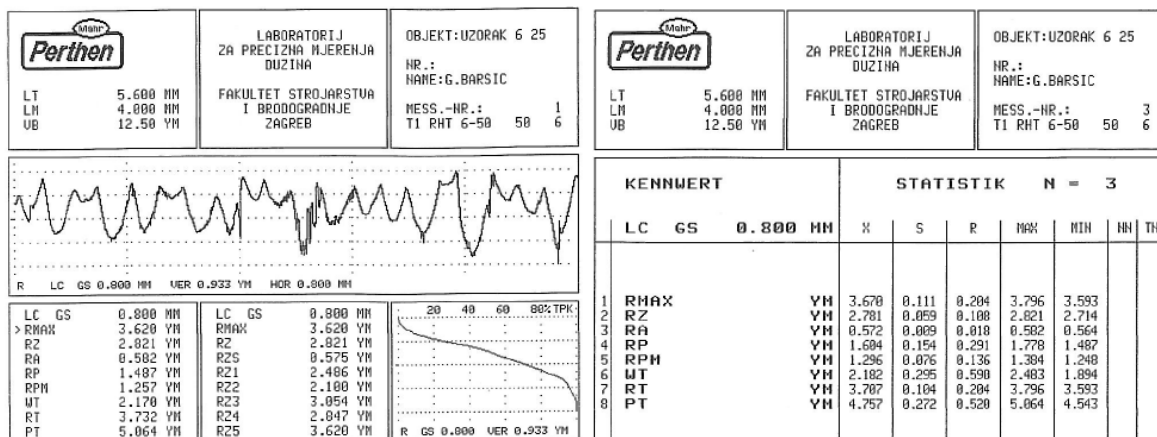
Slika 79. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+15^\circ$

- Nagib glodala $+20^\circ$



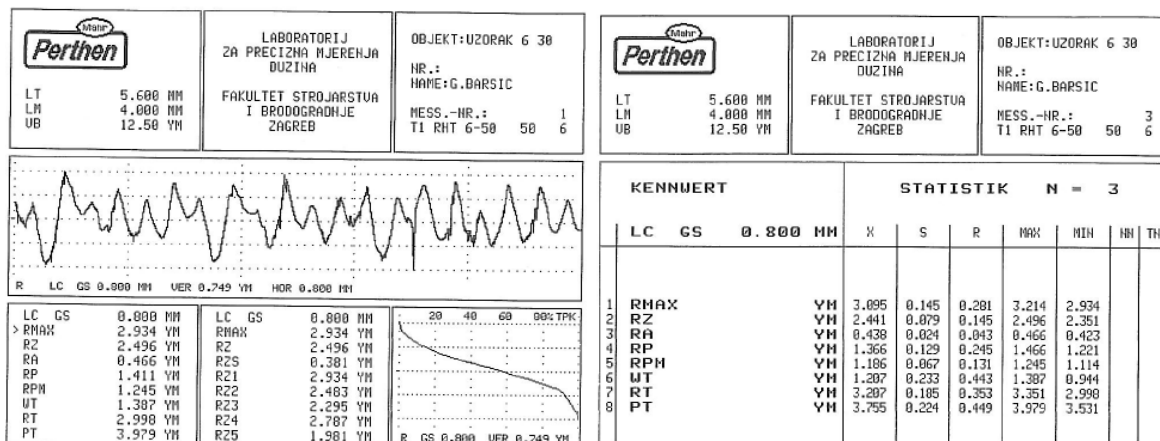
Slika 80. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+20^\circ$

- Nagib glodala $+25^\circ$



Slika 81. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+25^\circ$

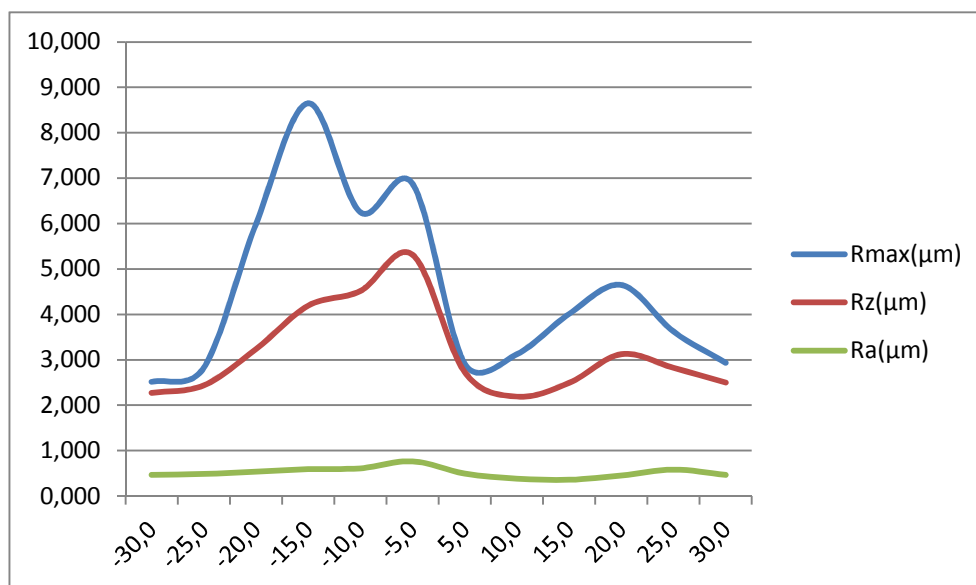
- Nagib glodala $+30^\circ$



Slika 82. Rezultati mjerenja za čelični uzorak za nagib kuta $+30^\circ$

- Prikaz rezultata

	-30°	-25°	-20°	-15°	-10°	-5°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
Rmax(μm)	2,512	2,822	5,988	8,649	6,249	6,876	2,911	3,123	4,010	4,645	3,620	2,934
Rz(μm)	2,268	2,435	3,232	4,189	4,514	5,314	2,725	2,187	2,490	3,122	2,821	2,496
Ra(μm)	0,468	0,488	0,535	0,591	0,610	0,763	0,494	0,385	0,358	0,451	0,582	0,466



Slika 83. Prikaz rezultata za čelični uzorak u rasponu kutova valjanja od -30° do +30°

12 PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Petoosna obrada se, u novije vrijeme, sve više koristi i bez takve vrste obrade bi bilo teško i zamisliti određene proizvodne procese. Stoga je potrebno neprekidno vršiti nova ispitivanja u svrhu poboljšanja proizvodnje u smislu uštede, brzine izrade i kvalitete proizvoda.

Gledajući na eksperiment koji je obrađen u ovom diplomskom radu, može se reći da je to samo početak jednog opširnog ispitivanja koje bi nam dalo bolji uvid u rezultate obrade u ovim uvjetima pokusa. Sljedeći koraci ispitivanja bili bi:

- U proizvodnji je čest slučaj da se koriste veoma tvrdi materijali. Materijali koji su obrađeni u ovom pokusu spadaju u mekše materijale (max 190 HB). Dakle, jedan od koraka ispitivanja bio bi korištenje drugog materijala.
- Izbor glodala je jako važan čimbenik procesa petoosnog glodanja. U ovisnosti od materijala glodala (presvlaka, glodalo od tvrdog metala, HSS...) ovisi nam i rezultirajuća kvaliteta površine. Također, bilo bi korisno isto ispitivanje izvršiti sa različitim dimenzijama glodala i na taj način pokazati utjecaj veličine glodala na obrađenu površinu kao i na brzinu izrade zadržavajući istu hrapavost površine.
- Promjena uvjeta obrade; broj okretaja vretena, posmak, aksijalni pomak, radijalna dubina rezanja. To su parametri koji ponajviše utječu na hrapavost površine, pa bi, sukladno tome, mogli izvršiti veliki broj ispitivanja mijenjajući te parametre.

13 ZAKLJUČAK

Petoosne obrade predstavljaju dinamično područje koje pruža mnoge mogućnosti. Za očekivati je da će s vremenom strojevi za takve obrade postajati još kompleksniji i djelotvorniji, te da će CAD/CAM sustavi razvijati dodatne mogućnosti za njihovo upravljanje. Uvođenjem petoosne obrade povećana je točnost izrade izradaka, smanjena mogućnost pogreške, smanjeno vrijeme izrade, te konstruktoru omogućeno da u potpunosti iznese svoju kreativnost prilikom dizajniranja proizvoda. Petoosna obrada se nikada ne koristi sama, niti se komad u kompletu izrađuje petoosnom obradom, već se uvijek koristi kombinacija troosne i petoosne obrade. Troosnom obradom se obradi kompletan komad, a za petoosnu obradu se ostave samo površine koje se ne mogu obraditi troosnom obradom.

Kutovi valjanja i poniranja glodala povećavaju sposobnost procesa petoosnog glodanja prstastim glodalom sa zaobljenim vrhom u smislu poboljšane pristupačnosti i obrade kompleksnih površina. Međutim, njihovi učinak na sile koje se javljaju pri takvom glodanju, mehaniku i dinamiku procesa nije poznat previše i to smo pokušali pobliže opisati u ovom radu.

Najveća prednost petoosnog glodanja je izbjegavanje kontakta vrha glodala, u kojem je brzina rezanja jednaka nuli i površine radnog komada. Različiti kutovi nagiba glodala uvelike utječu na sile rezanja, snagu, moment i oblik pogreške budući da mijenjaju mehaniku i geometriju procesa. Pravilnim izborom parametara, nagiba glodala, brzine rezanja možemo uvelike utjecati na kompletan proces glodanja, smanjiti negativne utjecaje koji se pri tom javljaju i u velikoj mjeri poboljšati proces u smislu povećanja brzine izrade, poboljšanja kvalitete površine što na kraju dovodi i do velike uštede prilikom izrade.

Promatrajući rezultate pokusa možemo donijeti nekoliko zaključaka:

- Kao što je i očekivano, pokus pokazuje da je obrada bez nagiba glodala, u kojoj je vrh kuglastog glodala u dodiru sa površinom radnog komada nepovoljan i na svim uzorcima možemo vidjeti da nepovoljno utječe na hrapavost površine.
- U uvjetima negativnog kuta valjanja glodala (nagib oko osi okomite na os posmaka), u kojoj glodalo vrši protusmjerno glodanje, dobiveni su rezultati koji u velikoj mjeri odstupaju od ostalih rezultata u negativnom smislu, čak i

od rezultata u kojima glodala nije nagnuto, što nam pokazuje da protusmjerno glodanje negativno utječe na hrapavost površine.

- U uvjetima poniranja glodala (nagib osi oko osi posmaka) vidimo da je, za aluminijski uzorak, maksimalna visina neravnina R_{max} najmanja u slučaju nagiba glodala 15° , dok je za čelični uzorak R_{max} najmanja u slučaju nagiba glodala 5° .

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

LITERATURA

- [1] Investigation of the lead and tilt angle effects in the 5-axis ball-end milling processes
Erdem Ozturk, L. Taner Tunc, Erhan Budak
Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University, Istanbul, Turkey
- [2] Modelling of the 5-axis milling Forces
Erdem Ozturk and Erhan Budak
Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University, Istanbul, Turkey
- [3] CNC alatne mašine
<http://www.scribd.com>
- [4] CAD/CAM tehnologije
<http://mfkg.kg.ac.rs/>
- [5] Fields of Application for 5-Axis Machining
www.heidenhein.de
- [6] Značajke petoosnih obrada
Saša Franjić
Fakultet strojarstva i brodogradnje